

Marja-Terttu Sikiö

Bentoniitista rakennettujen pohjaveden- suojausrakenteiden toimivuuden taustaselvitys



Marja-Terttu Sikiö

Bentoniitista rakennettujen pohjavedensuojausrakenteiden toimivuuden taustaselvitys

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 48/2016

Liikennevirasto
Helsinki 2016

Kannen kuva: Janne Skinnarla / Vastavalo.fi

Verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-317-324-8

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

Marja-Terttu Sikiö: Bentoniitista rakennettujen pohjavedensuojausrakenteiden toimivuuden taustaselvitys. Liikennevirasto, tekniikka ja ympäristö -osasto. Helsinki 2016. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 48/2016. 57 sivua. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-324-8.

Avainsanat: pohjavesi, bentoniitti, ympäristö, ympäristönsuojelu, tiet

Tiivistelmä

Pohjavesikysymykset ovat osa liikenteen ympäristötyön keskeisimpiä haasteita vuosina 2013–2020. EU:n vesipuitedirektiivistä johtuvana tavoitteena on liikenteen hallinnonalalla pohjavesien hyvä laadullinen tila vuoteen 2020 mennessä myös niillä alueilla, joissa liikenneväylä kulkee pohjavesialueella. Liikenneviraston ympäristötyön lähiaikojen päätavoitteita ovat pohjavesikysymyksissä riskialttiimpia pohjavesialueita koskevien tietojen päivittäminen ja torjuntatoimenpiteiden määrittäminen näille alueille sekä kiireellisimpien pohjavesisuojausten toimenpiteiden toteuttaminen vuoteen 2020 mennessä.

Tämän selvitys on laadittu osana Liikenneviraston ympäristöohjelman toteutusta. Selvitys käynnistettiin, koska aiemmissa tutkimuksissa ja selvityksissä oli todettu, että liukkaudentorjunta-aineena käytetyllä kaliumformiaatilla saattaa olla haitallisia vaikutuksia pohjavedensuojausrakenteissa tiivistyskerroksena käytettävän bentoniitin vedenläpäisevyysominaisuuksiin. Selvityksessä on tunnistettu liukkaudentorjunta-aineena käytetyn kaliumformiaatin käytön vaikutuksiin liittyviä tietopuutteita, nostettu esille pohjavedensuojauksia koskevan ohjeistuksen uudistamiseen vaikuttavia asioita sekä laadittu suositukset myöhemmin mahdollisesti toteutettavalle pohjavesisuojausten kuntoa kartoittavalle laboratorio- ja in situ -tutkimukselle.

Pohjavedet muodostavat maailman suurimman makean veden varaston. Ihmistoimintojen vaikutukset pohjaveteen ovat pitkäaikaisia, sillä pohjavesi vaihtuu ja pohjaveteen joutuneet haitta-aineet poistuvat hitaasti. Pohjavesien suojelulla on pitkä tausta Euroopassa. Ensimmäinen pohjavesiä koskeva direktiivi annettiin jo vuonna 1980. Sen jälkeen on asetettu useita vesien käyttöä ohjaavia direktiivejä ja vuonna 2012 julkaistiin suunnitelma Euroopan vesivarojen turvaamiseksi vauhdittamaan vuoden 2000 vesipuitedirektiivin tavoitteiden saavuttamista. Pohjavesien määrällinen ja laadullinen tila vaihtelevat Euroopassa hyvin paljon ja Suomessa tilanne on huomattavasti parempi kuin monissa muissa EU-alueen maissa.

Pohjavesien suojelua Suomessa ohjaa tärkeimpinä ympäristönsuojelulaki, vesilaki sekä lait vesienhoidon ja merenhoidon järjestämisestä. Suojelun pääperiaatteet ovat pohjavesien pilaamiskielto ja pohjavesien muuttamiskielto. Pohjavesialueet on nykyisin Suomessa luokiteltu vedenhankintaan soveltuvuuden ja suojelutarpeen perusteella kolmeen luokkaan. Luokittelu on muuttunut (1.2.2015) ja pohjavesialueiden luokituksen tarkistaminen on parhaillaan ELY-keskuksissa käynnissä.

Pohjavesien suojelussa avainasemassa ovat likaantumista ennaltaehkäisevät keinot, joita ovat mm. suojelusuunnitelmien laatiminen ja pohjavesialueiden tilan seuranta, toimintojen riskejä vähentävä sijoittaminen sekä väylänpidossa mm. vaihtoehtoisten liukkaudentorjunta-aineiden käyttö tai pohjavesisuojausten rakentaminen. Maantieverkolle on toteutettu pohjavesien luiskasuojauksia noin 290 km. Ensimmäiset pohjavesisuojaukset rakennettiin jo 1980-luvulla. Nykyisin pohjavedensuojauksia rakennetaan uusien teiden rakentamisen ja vanhojen teiden korjaamisen yhteydessä 1–2 koh-

teeseen vuosittain. Nykyiset rakenteet ovat suojausteholtaan merkittävästi parempia kuin esimerkiksi ennen vuotta 1990 toteutetut rakenteet. Vaihtoehtoisten liukkaudentorjunta-aineiden käyttötutkimukset alkoivat 1990-luvulla ja pian sen jälkeen käyttökokeilut. Talvihoitokaudella 2014–2015 kaliumformiaatti oli käytössä maanteiden liukkaudentorjunnassa yhteensä 32 pohjavesialueella. Ruotsissa pohjaveden suojausrakenteita ei ole juurikaan toteutettu suojaamalla tieluiskia yhdistelmärakenteella. Ruotsissa suojaustoimenpiteet ovat olleet useimmiten kevyempiä – esimerkiksi reunakivilinjan ja hulevesiviemäröinnin rakentaminen tai korkealuokkaisemman tiekaikeen rakentaminen, jotta estettäisiin raskaiden ajoneuvojen suistumisonnettomuudet.

Maanteiden pohjavesisuojausissa tiivistysrakenteessa käytetään yhdistelmärakennetta, jossa tiivistyskerroksena toimivat bentoniittimatto tai maatiiviste ja geomembraani (ohutmuovi) yhdessä. Tiivistyskerros suojataan vaurioitumiselta ja kuivumiselta suojaavalla maakerroksella. Aiemmissa tutkimuksissa on epäilty, että vaihtoehtoisena liukkaudentorjunta-aineena käytetty kaliumformiaatti saattaisi aiheuttaa pitkällä aikavälillä bentoniitin vedenläpäisevyysominaisuuksien heikkenemistä johtuen bentoniitin päämineraalin montmorillonitiin ioninvaihdosta (Na^+ vaihtuu K^+ :ksi). Samanlainen vaikutus on aiempien selvitysten mukaan myös kalsiumkloridilla (Na^+ vaihtuu Ca^{2+} :ksi). Selvityksen mukaan maanteiden hulevesien haitta-aineiden pitoisuudet eivät todennäköisesti ole niin suuria, että kaliumformiaatin aiheuttama ioninvaihto heikentäisi merkittävästi bentoniitin vedenläpäisevyysominaisuuksia. Kahdenarvoisten kationien, kuten kalsium, vaikutus bentoniitin vedenläpäisevyyteen on suurempi kuin yhdenarvoisten kationien, kuten kalium. Toimivien bentoniitista rakennettujen pohjavesisuojausten kohdalla ei suositella kaliumformiaatin käyttöä liukkaudentorjunnassa.

Suurimmat haitalliset vaikutukset bentoniittikerrokseen kohdistuvat yhdistelmärakenteissa sellaisiin kohtiin, jossa tiivistyskerrosta suojaava geomembraani on rikki ja esimerkiksi nykyisten rakenteiden ulkoluisikan tiivistyskerrokseen, koska sinne ei ole asennettu kuivumiselta suojaavaa geomembraania. Pohjavesisuojausten luiskassa ja pientareella rikkoutuneen geomembraanin rei'istä tiivistyskerroksen läpi suotautuvat vesimäärät ovat todennäköisesti pieniä. Suurin vedenpaine ja suurimmat vuotoriskit kohdistuvat ojan pohjalla tiivistysrakenteen alimpaan kohtaan. Onnettomuussuojaukset pohjavesialueella rakennetaan ilman geomembraania, mistä johtuen ioninvaihtoreaktion ja siitä johtuvan vedenläpäisevyyden heikkenemisen mahdollisuus on suurempi kuin kloridisuojausrakenteissa. Toisaalta onnettomuussuojauksissa rakenteen säilyminen kosteampana tiivistysrakenteen pohjalla, kun kuivatusrakenteita ei ole, on rakenteen toimivuuden säilymistä edistävä tekijä. Tutkimuksia pohjavesisuojausten tiivistyskerrokseen asennettujen bentoniittimattojen ominaisuuksien säilymisestä (mm. vesipitoisuus, vedenläpäisevyys, kemiallinen koostumus) ei ole Suomessa tehty.

Marja-Terttu Sikiö: Bakgrundsutredning av funktionen hos grundvattenskydds-konstruktioner av bentonit. Trafikverket, teknik och miljö. Helsingfors 2016. Trafikverkets undersökningar och utredningar 48/2016. 57 sidor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-324-8.

Sammanfattning

Grundvattenfrågorna hör till de viktigaste utmaningarna inom trafikens miljöarbete åren 2013–2020. I enlighet med EU:s vattendirektiv har förvaltningsområdet trafik som mål att grundvattnen kvalitativt är i gott skick före år 2020 också i de områden där trafikleder går över ett grundvattenområde. Trafikverkets huvudmål inom miljöarbetet för den närmaste framtiden i grundvattenfrågor är att uppdatera uppgifterna om de mest riskfyllda grundvattenområdena och att fastställa avväjningsåtgärder för dessa områden samt att genomföra de mest brådskande grundvattenskyddsåtgärderna före år 2020.

Den här redogörelsen har utarbetats som en del av Trafikverkets miljöprogram. Utredningen inleddes, eftersom det i tidigare undersökningar och redogörelser hade konstaterats att kaliumformiat, som används som halkbekämpningsmedel, kan ha skadlig inverkan på vattenpermeabilitetsegenskaperna hos bentonit, då det används som tätskikt i grundvattenskyddskonstruktioner. I redogörelsen har man identifierat brister i informationen om vilka konsekvenserna är av kaliumformiat som använts som halkbekämpningsmedel, lyft fram faktorer som bör beaktas då anvisningarna om grundvattenskydd förnyas samt utarbetat rekommendationer för eventuella senare laboratorie- och in situ-undersökningar som kartlägger grundvattenskyddens skick.

Grundvattnen bildar världens största sötvattenreserv. Miljöåtgärdernas inverkan på grundvattnet är långvariga, eftersom grundvattnet byts ut långsamt och det tar lång tid innan skadliga ämnen som hamnar i grundvattnet försvinner. Grundvattenskyddet har en lång bakgrund i Europa. Det första direktivet om grundvatten utfärdades redan år 1980. Efter det har det getts flera direktiv som styr användningen av vatten och år 2012 publicerades en plan för trygga vattenresurserna i Europa i syfte att snabbare uppnå målen i vattenramdirektivet från år 2000. Grundvattnens kvantitativa och kvalitativa tillstånd varierar relativt mycket i Europa och i Finland är situationen betydligt mycket bättre än i många andra länder i EU-området.

De viktigaste lagarna som styr grundvattenskyddet i Finland är miljöskyddslagen, vattenlagen och lagen om vattenvårds- och havsvårdsförvaltningen. Skyddets huvudprinciper är förbud mot att förorena grundvatten och förbud att ändra grundvatten. Grundvattenområdena är i Finland för närvarande klassificerade utifrån grundvattenområdenas lämplighet för vattenförsörjning och skyddsbehovet i tre klasser. Klassificeringen har ändrats (1.2.2015) och NMT-centralerna håller för tillfället på att justera klassificeringen av grundvattenområdena.

Åtgärder för att förebygga förorening är i nyckelställning inom grundvattenskyddet, vilka bl.a. är att upprätta skyddsplaner och att följa upp grundvattnets tillstånd, investeringar som minskar riskerna i verksamhet samt inom trafikledshållning bl.a. användningen av alternativa halkbekämpningsmedel eller byggande av grundvattenskydd. I landsvägsnätet har det byggts cirka 290 km släntskydd i grundvattenområden. De första grundvattenskydden byggdes redan på 1980-talet. För närvarande byggs grundvattenskydd i samband med att det byggs nya vägar och gamla vägar

repareras i 1–2 objekt per år. De moderna konstruktionerna är till sin skyddseffekt betydligt bättre än t.ex. de konstruktioner som byggdes före år 1990. Undersökningarna av användningen av alternativa halkbekämpningsmedel började på 1990-talet och snabbt därefter provtestningen. Under vinterunderhållssäsongen 2014–2015 användes kaliumformiat inom halkbekämpningen på vägar i sammanlagt 32 grundvattenområden. I Sverige har grundvattenskyddet nästan inte alls genomförts genom att skydda vägslänter med sammansatta konstruktioner. I Sverige har skyddsåtgärderna oftast varit lättare – t.ex. byggandet av en kantstenslinje och dagvattenavlopp eller av vägräcken av högre kvalitet för att hindra att tunga fordon kör av vägen.

I tätskiktet i grundvattenskydd för landsvägar används en sammansatt konstruktion där tätskiktet består av en betonitmatta eller marktäkt och ett geomembran (tunnplast). Tätskiktet skyddas från skador och torka med ett skyddande markskikt. I tidigare undersökningar har det misstänkts att kaliumformiat som använts som alternativt halkbekämpningsmedel kan leda till att vattenpermeabiliteten hos betonit försvagas på lång sikt, vilket beror på jonbyte i betonitets huvudmineral montmorillonit (Na^+ byts ut mot K^+). Enligt tidigare utredningar har även kalciumklorid samma verkan (Na^+ byts ut mot Ca^{2+}). Enligt utredningen är halterna av skadliga ämnen i landsvägarnas dagvatten sannolikt inte så stora att det jonbyte som kaliumformiatet orsakar i betydande grad skulle försvaga vattenpermeabilitetsegenskaperna hos bentonit. Inverkan av tvåvärda katjoner, t.ex. kalcium, på vattenpermeabiliteten hos bentonit är större än för envärda katjoner, såsom kalium. Då det gäller fungerande grundvattenskydd som byggts av bentonit rekommenderas inte användning av kaliumformiat som halkbekämpning.

I sammansatta konstruktioner hänför sig de största skadliga verkningarna på bentonitskikten till sådana ställen, där geomembranen som skyddar tätskiktet är sönder och t.ex. i nuvarande konstruktioner till yttersläntens tätskikt, eftersom det där inte har installerats någon genomembran som skyddar mot torka. De vattenmängder som tränger igenom hålen i en geomembran som gått sönder i ett grundvattenskydd på en vägslänt eller -sluttning är sannolikt små. Det största vattentrycket och de största läckageriskerna hänför sig till tätningskonstruktionens lägsta ställe i dikets botten. Olycksfallsskydd på grundvattenområden byggs utan geomembran, vilket innebär att risken för en jonbytesreaktion och en försvagad vattenpermeabilitet till följd av det är större än i konstruktioner med kloridskydd. Å andra sidan är det faktum att olycksfallsskyddets konstruktion hålls fuktigare på tätskiktskonstruktionens botten då det inte finns några torkningskonstruktioner en faktor som förbättrar konstruktionens funktion. Undersökningar om hur väl egenskaperna hos betonitmattor som installerats i tätskikten i grundvattenskydd bibehålls (bl.a. vattenhalt, vattenpermeabilitet, kemisk sammansättning) har inte gjorts i Finland.

Marja-Terttu Sikiö: Background study on the effectiveness of bentonite groundwater protections. Finnish Transport Agency, Technology and Environment. Helsinki 2016. Research reports of the Finnish Transport Agency 48/2016. 57 pages. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-324-8.

Summary

Groundwater questions are among the biggest environmental challenges facing the transport sector in 2013–2020. The EU Water Framework Directive stipulates that groundwater must achieve “good qualitative status” by 2020, and this also applies to groundwater areas where there are transport routes. The Finnish Transport Agency’s short-term priorities with regard to groundwater include inventoring the most vulnerable groundwater areas and deciding on preventive measures in these areas, as well as implementing the most urgent measures by 2020.

This study is part of the Finnish Transport Agency’s environmental programme. The impetus for the study came from previous investigations and studies that have found that potassium formate, which is used as a deicing salt on roads, could have harmful effects on the permeability of the bentonite liner in groundwater protections. The study involved identifying knowledge gaps relating to the effects of the use of potassium formate as a deicing salt and factors that will need to be taken into account when guidelines on groundwater protections are next revised, as well as drawing up recommendations for laboratory tests and in-situ investigations that may be subsequently carried out in order to assess the condition of groundwater protections.

Groundwater is the largest active freshwater reserve on the planet. The effects of human activity on groundwater take a long time to clear, as the renewal rate of groundwater and therefore also contaminant transport rates are extremely slow. Groundwater protection has a long history in Europe. The first European Directive concerning groundwater was adopted in 1980. Several Directives on the use of water resources have been issued since then, and a Blueprint to Safeguard Europe’s Water Resources was published in 2012 to promote the implementation of the 2000 Water Framework Directive. The quantitative and qualitative status of groundwater varies substantially across Europe, and the situation in Finland is significantly better than in many other EU countries.

The most important legislative instruments governing groundwater protection in Finland are the Finnish Environmental Protection Act, the Water Act, and the Act on Water Resources Management. Groundwater protection is based on two main principles: a groundwater pollution prohibition and a prohibition on altering groundwater. Groundwater areas in Finland are currently classified into three categories based on suitability for water supply and need for protection. The categories were revised on 1 February 2015, and Centres for Economic Development, Transport and the Environment are in the process of updating their groundwater classifications.

Among the most important means of protecting groundwater are preventive solutions, such as conservation plans and monitoring the status of groundwater areas, positioning pollution sources in low-risk areas, using alternative deicing substances on roads, and building groundwater protections. There are groundwater protections along approximately 290 km of the road network. The first barriers date back to the 1980s. Between one and two groundwater protections per year are constructed in connection with building new roads and repairing existing ones. Modern groundwater protections are considerably more effective than those built before the year 1990. The use of alternative deicing solutions has been studied since the 1990, and practical trials began shortly thereafter. Potassium formate was used as a deicing salt on roads in a total of 32 groundwater areas in the winter of 2014/2015. In Sweden, the use of permeable groundwater protections in road structures is rare. Most of the solutions used in Sweden are more lightweight, such as curb-gutter-sewer systems and sophisticated guardrails designed to prevent heavy goods vehicle derailments.

Groundwater protections along the road network consist of a bentonite or soil liner and a geomembrane (thin plastic sheet). The liner is covered by a protective layer of soil to prevent damage and drying. Previous studies suggest that potassium formate, which is used as a deicing salt on roads, could compromise the permeability of bentonite over time due to ion exchange ($\text{Na}^+ \rightarrow \text{K}^+$) on montmorillonite, the main mineral component of bentonite. A similar effect has also been observed on calcium chloride ($\text{Na}^+ \rightarrow \text{Ca}^{2+}$). The study indicates that the levels of contaminants in road runoff are probably not high enough to cause the ion exchange resulting from potassium formate to compromise the permeability of bentonite to a significant degree. The effect of divalent cations, such as calcium, on the permeability of bentonite is greater than that of monovalent cations, such as potassium. The use of potassium formate as a deicing salt is not recommended on roads that have a bentonite groundwater protection.

The risk of harmful effects on the bentonite liner is the highest in places where the protective geomembrane is broken and along the edges of the barrier structure where there is no geomembrane to protect the structure from drying. The volume of water seeping through the liner along the curbside or where holes occur in the geomembrane under the hard shoulder is likely to be small. The highest water pressure levels and the greatest risk of leaks are concentrated in the lowest point of the liner at the base of the structure. Spill barriers in groundwater areas are built without a geomembrane, which increases the risk of ion exchange and consequently the potential damage to permeability compared to chloride barriers. On the other hand, the higher moisture levels at the base of the liner in spill barriers where there is no drying mechanism help the structure to maintain its effectiveness for longer. No studies have been conducted in Finland on how bentonite liners in groundwater protections maintain their characteristics (e.g. moisture content, permeability, chemical composition) over time.

Esipuhe

Tämä selvitys on laadittu osana Liikenneviraston ympäristöohjelman toteutusta ja se toimii taustaselvityksenä Liikenneviraston pohjavedensuojausohjeen päivitykselle.

Selvityksen ohjausryhmässä ovat toimineet Laura Pennanen ja Tuula Säämänen Liikennevirastosta sekä Arto Kärkkäinen, Timo Kinnunen ja Elina Kerko Uudenmaan ELY-keskuksesta. Selvityksen laatimisesta on vastannut Marja-Terttu Sikiö Destia Oy:stä.

Helsingissä marraskuussa 2016

Liikennevirasto
Tekniikka ja ympäristö -osasto

Sisällysluettelo

1	SELVITYKSEN TAUSTA JA TAVOITTEET	11
2	POHJAVESIEN SUOJELUN PERIAATTEET	12
2.1	Periaatteet Euroopassa.....	12
2.2	Periaatteet Suomessa	14
2.3	Periaatteet Ruotsissa	19
3	POHJAVESIEN SUOJAAMISEN TOIMENPITEET	22
3.1	Toimenpiteet Suomessa	22
3.2	Esimerkkejä pohjavedensuojaustoimenpiteistä Ruotsista	30
4	BENTONIITTI POHJAVEDENSUOJAUSRAKENTEESSA.....	38
4.1	Yleistä bentoniitin ominaisuuksista.....	38
4.2	Kemikaalien vaikutus bentoniitin vedenläpäisevyyteen ja paisumisominaisuuksiin.....	40
4.3	Hulevesien ja vajovesien vaikutus bentoniittiin	43
4.4	Bentoniitin ioninvaihdon vaikutukset pohjavedensuojausten toimivuuteen	48
5	JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET	50
	LÄHTEET	54

1 Selvityksen tausta ja tavoitteet

Pohjavesikysymykset ovat osa liikenteen ympäristöpolitiikan keskeisimpiä haasteita vuosina 2013–2020. EU:n vesipuitteidirektiivistä johtuvana tavoitteena on liikenteen hallinnonalalla pohjavesien hyvä laadullinen tila vuoteen 2020 mennessä myös niillä alueilla, joissa liikenneväylä kulkee pohjavesialueella. Liikenneviraston ympäristötyön tavoitteita on täsmennetty ympäristötoimintalinjassa, jonka mukaan lähiaikojen ympäristötyön päätavoitteita ovat mm. riskialttiimpia pohjavesialueita koskevien tietojen päivittäminen ja torjuntatoimenpiteiden määrittäminen näille alueille sekä kiireellisimpien pohjavesisuojausten toimenpiteiden toteuttaminen vuoteen 2020 mennessä. Keinoina asetettuihin tavoitteisiin pääsemiseksi ja tienpidon pohjavesiriskien vähentämiseksi Liikennevirasto on ympäristötoimintalinjassaan määritellyt mm. suolan käytön minimoinnin ja suolaa korvaavien aineiden käytön (mm. kaliumformiaatti) lisäämisen liukkaudentorjunnassa. (Liikennevirasto, 2014) Ympäristöohjelmassaan vuosille 2015–2018 Liikennevirasto on esittänyt toimenpiteet tavoitteiden saavuttamiseksi. Yhtenä toimenpiteenä on esitetty selvityksen tekeminen kaliumformiaatin käytön vaikutuksista bentoniittisiin pohjavesisuojauxiin. (Liikennevirasto, 2015a)

Kaliumformiaatti on otettu käyttöön liukkaudentorjunnassa pitkäaikaisen tutkimuksen ja käyttökokeilujen (MIDAS-hanke ja MIDAS2-hanke sekä aiemmat selvitykset (MIDAS: Migration of alternative de-icing chemicals in aquifers)) jälkeen joillain sellaisilla pohjavesialueilla, joissa vesien kloridipitoisuudet ovat nousseet liukkaudentorjunnassa käytetyn suolan vaikutuksesta. Käyttöä on suositeltu pohjavesien suojelusuunnitelmissa, ja käyttöä tullaan todennäköisesti lisäämään hoidon ja ylläpidon alueurakoiden kilpailutusten tahdissa.

Aiemmissa vaihtoehtoisia liukkaudentorjunta-aineita koskevissa tutkimuksissa on nostettu esiin kaliumformiaatin mahdollinen vaikutus pohjavesisuojauxissa käytetyn bentoniitin paisumisominaisuuksiin ja sitä kautta toimivuuteen pohjavedensuojausrakenteen tiivistyskerroksena. Laboratoriossa tehtyjen paisumiskokeiden (ASTM D 5890-menetelmä (ASTM: the American Society for Testing Materials, kansainvälinen standardointiorganisaatio)) tulosten perusteella todettiin, että kaliumformiaatti heikentää bentoniitin paisumisominaisuuksia ja sitä kautta vedenläpäisevyyssominaisuuksia. Näihin tutkimushavaintoihin perustuen vaihtoehtoisia liukkaudentorjunta-aineita tutkineen MIDAS-hankkeen suosituksena esitettiin seuraavaa: *”Bentoniittisuojauxissa kaliumin ioninvaihdon vaikutusta ei tunneta suojausten pitkäaikaiskestävyyteen. Natrium-ionin vaihtuminen Kalium-ioniksi voi teoriassa vähentää bentoniitin paisumiskykyä. Alueilla, joissa on toimiva kloridisuojaus, ei suositella kaliumformiaatin käyttöä. Alueilla, joissa kloridisuojaus on rakennettu, mutta se ei toimi tai toimii puutteellisesti, voidaan käyttää kaliumformiaattia.”* (SYKE, 2016a)

Tämän selvityksen tavoitteena on tunnistaa kaliumformiaatin käytön vaikutuksiin liittyviä tietopuutteita, nostaa esille pohjavedensuojauxia koskevan ohjeistuksen uudistamiseen vaikuttavia asioita sekä laatia tutkimussuunnitelma myöhemmin mahdollisesti toteutettavalle laboratorio- ja in situ -tutkimukselle. Tavoitteena on kartoittaa riskit, joita kaliumformiaatin käyttö voi aiheuttaa maanteiden pohjavedensuojausrakenteille.

2 Pohjavesien suojelun periaatteet

2.1 Periaatteet Euroopassa

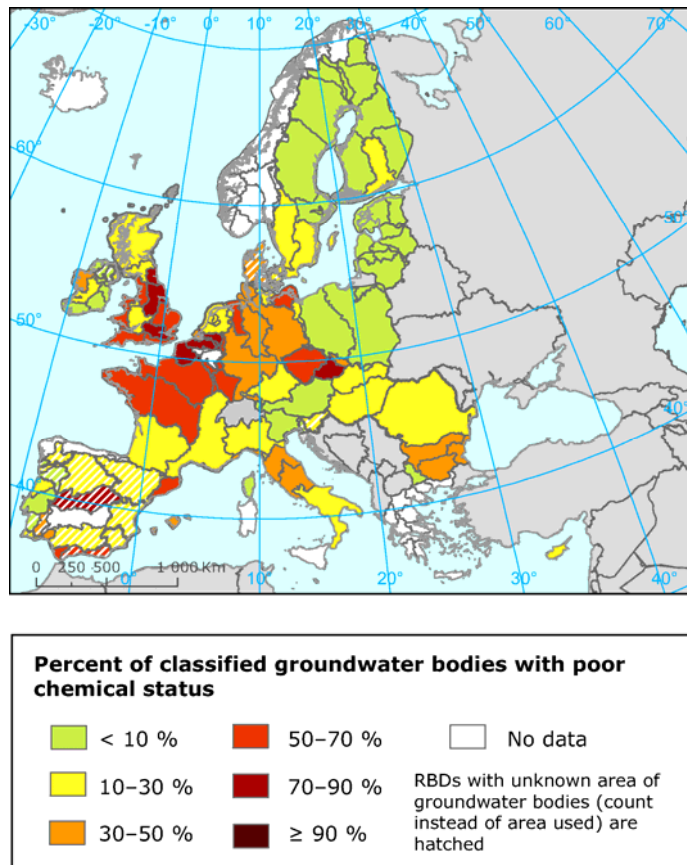
Pohjavedet muodostavat maailman suurimman makean veden varaston (97 prosenttia maailman käytettävissä olevasta makeasta vedestä (mukana ei ole jäätiköihin sitoutunut vesi). Noin 75 prosenttia EU:n alueen asukkaista on riippuvaisia pohjavedestä juomavedenlähteenään. Pohjavesi on ”piilossa” oleva luonnonvara, joka on määrällisesti paljon tärkeämpi kuin pintavesi ja jonka pilaantumisen ehkäiseminen, seuranta ja ennallistaminen ovat pintavesiin verrattuna paljon vaikeampaa. Ihmistoimintojen vaikutus pohjaveteen saattaa olla pitkäaikainen, koska pohjavesi liikkuu maaperän läpi hitaasti. (Euroopan komissio, 2008)

Pohjavesien suojelulla on pitkä tausta Euroopassa. Tavoitteena on säilyttää luonnon-tilaiset pohjavedet entisellään ja estää ihmistoimintaa heikentämästä pohjaveden laatua. Ensimmäinen pohjavesiä koskeva direktiivi annettiin vuonna 1980 (80/68/ETY), joskin sen soveltamisala oli rajoitettu vain teollisuudesta ja asutuksesta peräisin olevien päästöjen valvomiseen. Direktiivit maatalouden ja teollisuuden aiheuttaman saastumisen valvomiseksi annettiin myöhemmin. Ensimmäinen pohjavettä koskeva toimintaohjelma hyväksyttiin komissiossa 1996. Toimintaohjelman tavoite sisällytettiin neljä vuotta myöhemmin hyväksytyyn vesipolitiikan puitedirektiiviin.

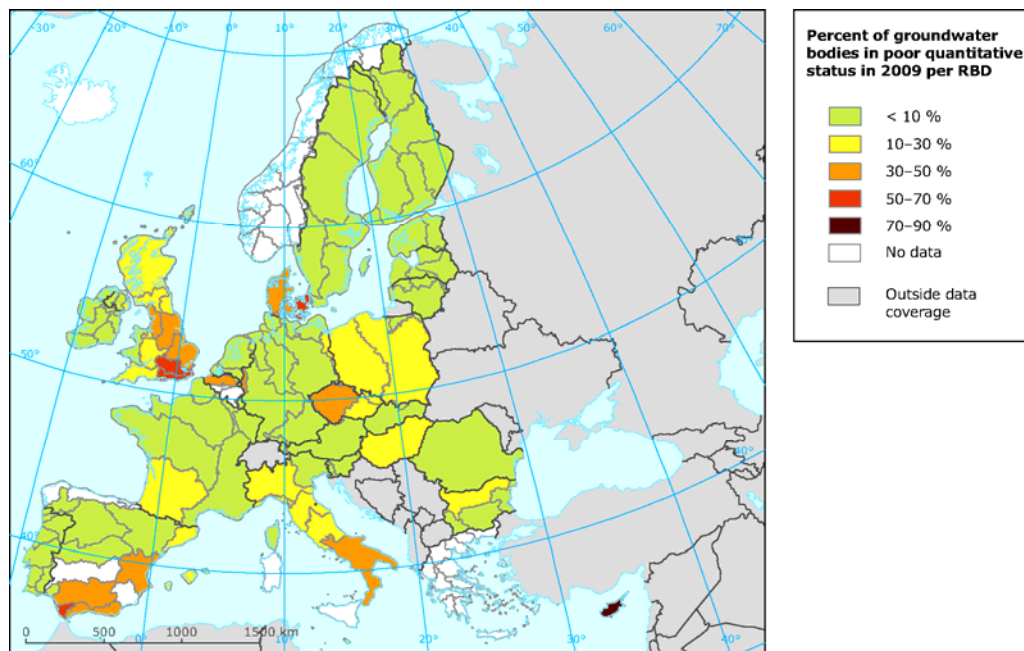
Vesipolitiikan puitedirektiivin (2000/60/EY) keskeisenä tavoitteena on pohjaveden hyvä määrällinen ja kemiallinen tila edistämällä vesivarojen kestävää käyttöä, estämällä pohjavesien pilaantuminen ja vähentämällä jo tapahtunutta pilaantumista. Jäsenvaltioiden tulee panna täytäntöön tarvittavat toimenpiteet pilaavien aineiden pääsyn ehkäisemiseksi ja rajoittamiseksi pohjaveteen. Ihmistoiminnasta aiheutuvat pilaavien aineiden pitoisuuksien merkitykselliset ja pysyvät nousevat muutossuunnat tulee kääntää laskeviksi ja näin vähentää asteittain pohjaveden pilaantumista. Puitedirektiivillä tartuttiin ensimmäistä kertaa kattavasti kaikkiin EU:n vesiin liittyviin haasteisiin ja tehtiin selväksi, että vesien hoito on paljon muutakin kuin vedenjakelua ja jätevedenkäsittelyä. Sääntelyä täydennettiin sen jälkeen vuonna 2006 direktiivillä pohjaveden suojelusta pilaantumiselta ja huononemiselta (2006/118/EY). (Euroopan komissio, 2008 ja 2012, Eduskunta, 2014)

Määrällisen tilan tavoitteet olivat jo vesipuitedirektiivissä (2000) selvät: tavoitteena on taata tasapaino pohjavedenoton ja muodostumisen välillä. Kemiallisen tilan perusteiden osalta tarvittiin lisäksi johdannaisdirektiivi (2006), jossa tarkennettiin hyvän kemiallisen tilan arviointiperusteet sekä pilaavien aineiden pitoisuuksien nousevien muutossuuntien tunnistaminen ja kääntäminen. (Euroopan komissio, 2008)

Euroopan komissio julkaisi vuonna 2012 suunnitelman Euroopan vesivarojen turvaamiseksi, jotta saavutettaisiin vesipuitedirektiivissä (2000) asetettu tavoite vesien hyvästä tilasta vuoteen 2015 mennessä. Suunnitelman lähestymistapa oli kolmiosainen: (1) lainsäädännön sallimien keinojen täysimääräinen hyödyntäminen vesiensuojelussa, (2) vesipolitiikan integrointi muihin politiikkoihin ja (3) vedenkäytön tehokkuuden parantaminen. Suunnitelma tulee ohjaamaan EU:n vesipolitiikkaa pitkällä aikajänteellä, sillä vesipuitedirektiivin tavoitteen saavuttamiseksi tarvitaan lisää aikaa. (Euroopan komissio, 2008, European Commission, 2015, EEA, 2016)



Kuva 1. Pohjavesien laadullinen tila Euroopassa (2005–2009) (EEA, 2016b)



Kuva 2. Pohjavesien määrällinen tila Euroopassa (2005–2009) (EEA, 2016c)

2.2 Periaatteet Suomessa

Tärkeimmät pohjavedensuojelua koskevat Suomen kansalliset säädökset ovat ympäristönsuojelulaissa, vesilaissa sekä laeissa vesienhoidon ja merenhoidon järjestämisestä. Näiden lisäksi pohjavettä koskevia säännöksiä on mm. maa-aines-, maankäyttö- ja rakennus-, terveydensuojelu-, vesihuolto-, jäte- ja kemikaalilaissa sekä öljyvahinkojen torjuntalainsäädännössä. Kansallisella lainsäädännöllä toteutetaan EU:n vesipolitiikan puitedirektiiviä. Keskeisimmät säännökset ovat pohjaveden pilaamiskielto, vedenottamon vesioikeudelliset suoja-alueet, vesitaloushankkeiden luvanvaraisuus sekä pohjavesialueiden määrittäminen ja luokittelu sekä suojelusuunnitelmat laissa vesienhoidon ja merenhoidon järjestämisestä. (Ympäristöhallinto, 2016b.)

Pohjavesialueet on nykyisin Suomessa luokiteltu vedenhankintaan soveltuvuuden ja suojelutarpeen perusteella kolmeen luokkaan. Luokittelu on muuttunut (1.2.2015) ja pohjavesialueiden luokituksen tarkistaminen on parhaillaan ELY-keskuksissa käynnissä. Vuoden 2019 loppuun mennessä luokittelu tulee olla tarkistettuna. Jatkossa vedenhankinnan kannalta tärkeät pohjavesialueet ovat luokan 1 alueita ja vedenhankintaan soveltuvat pohjavesialueet ovat luokkaa 2. Lisäksi sellaiset pohjavesialueet, joista pintavesi- tai maaekosysteemit ovat suoraan riippuvaisia, luokitellaan tulevaisuudessa uuteen E-luokkaan (1E, 2E ja E). (GTK, 2016a, Ympäristöministeriö, 2016, Petäjä-Ronkainen, 2016)

Taulukko 1. Pohjavesialueiden nykyinen luokittelu ja ennen 1.2.2015 voimassa ollut luokittelu

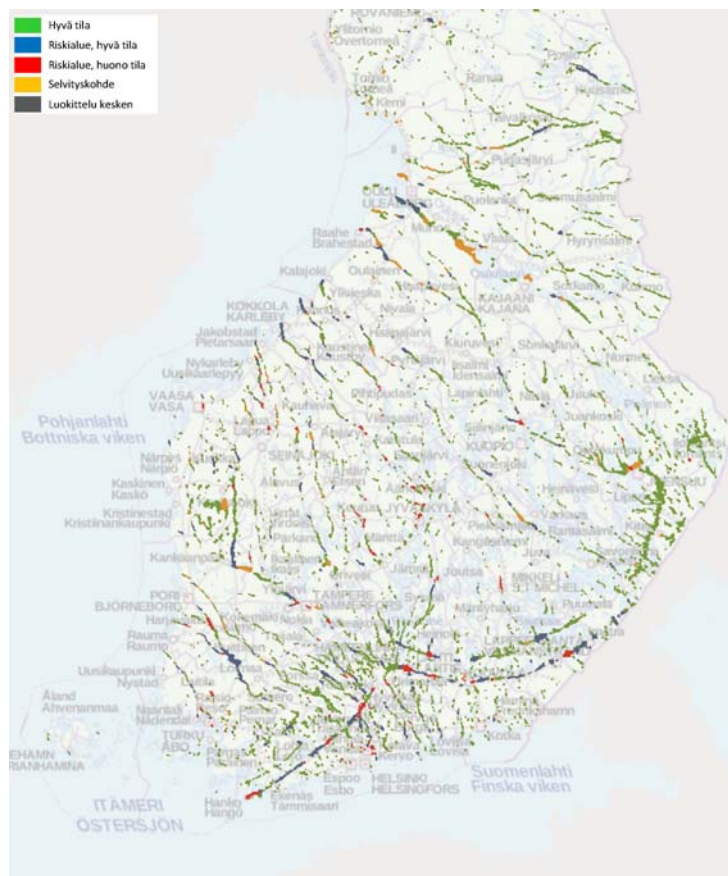
Pohjavesialueen nykyinen luokittelu	
1-luokka	vedenhankintaa varten tärkeä pohjavesialue, jonka vettä käytetään tai jota on tarkoitus käyttää yhdyskunnan vedenhankintaan taikka talousvetenä enemmän kuin keskimäärin 10 kuutiometriä vuorokaudessa tai yli viidenkymmenen ihmisen tarpeisiin
2-luokka	muu vedenhankintakäyttöön soveltuva pohjavesialue, joka pohjaveden antoisuuden ja muiden ominaisuuksiensa perusteella soveltuu 1 kohdassa tarkoitettuun käyttöön
E-luokka	pohjavesialue, jonka pohjavedestä pintavesi- tai maaekosysteemi on suoraan riippuvainen
Pohjavesialueen luokittelu ennen 1.2.2015	
I-luokka	vedenhankintaa varten tärkeä pohjavesialue.
II-luokka	vedenhankintaan soveltuva pohjavesialue.
III-luokka	muu pohjavesialue

Pohjavesien ja maaperän suojelu on yksi Liikenneviraston ja ELY-keskusten lähi vuosien ympäristötyön kehittämisen painopistealueista. I-luokan pohjavesialueilla on maanteitä 5970 km ja II-luokan pohjavesialueilla 2670 km. Väylänpidon pohjavesi riskit muodostuvat väylien kunnossapidosta (ennen kaikkea maanteiden liukkauden torjunnasta) sekä vaarallisten aineiden kuljetuksista maanteitse ja rautateitse. Riskit ovat suurimmillaan vilkkailla pääteillä. Liikennevirasto on arvioinut ympäristötoimintalinjassaan, että pohjavesiin ja maaperään kohdistuvat riskit tulevat tulevaisuudessa kasvamaan lisääntyvästä liikenteestä johtuen. Toisaalta pohjavesi riskien on arveltu pienenevän ja pohjavesien laadun paranevan niillä alueilla, joissa toteutetaan pohjavesi riskejä vähentäviä toimenpiteitä (pohjavesisuojuukset, suolaa korvaavat materiaalit, pohjaveden ja maaperän puhdistushankkeet). (Liikennevirasto 2014)

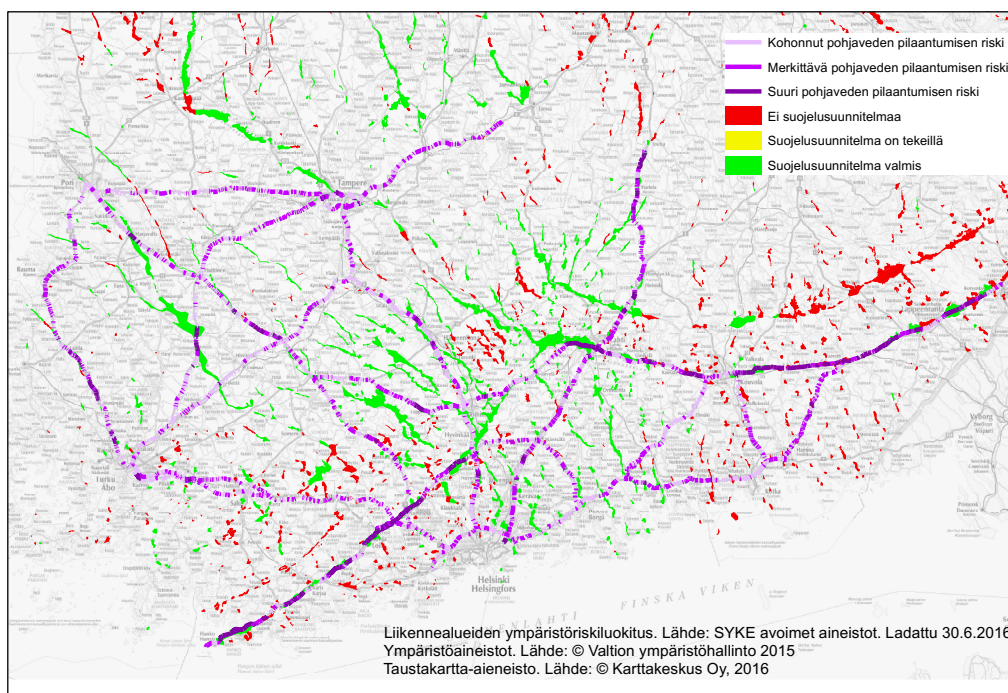
Pohjavesien laatu yleisesti Suomessa

Pohjavesialueita on Suomessa kartoitettu ja seurattu 1970-luvulta saakka ympäristöhallinnon toimesta. Suomen pohjavesivaroista suurin osa (95 %) on huokoisissa, karkearakeisissa sora- ja hiekkamuodostumissa, joiden vedenjohtokyky on kauttaaltaan hyvä. Näillä harju- ja kangasalueilla pohjavedeksi imeytyy 30–60 % sadannasta. Suomen pohjavesimuodostumat ovat tyypillisesti pieniä kalliokynnysten pilkkomia muodostumia ja pohjaveden laatu saattaa vaihdella merkittävästi maantieteellisesti hyvin lähekkäinkin sijaitsevilla alueilla. Laajimmat ja runsastuottoisimmat muodostumat ovat pitkittäisharjuissa ja suurissa reunamuodostumissa. Pohjavesimuodostumia sijaitsee epätasaisesti eri puolilla Suomea ja etenkin rannikkoalueilla niitä on vähän. Suomen julkinen vesihuolto perustuu pääosin näihin muodostumiin varastoituihin pohjavesivarantoihin. Julkisten vesilaitosten jakamasta vedestä noin 65 % on pohjavettä ja tekopohjavettä. (Petäjä-Ronkainen, 2016, GTK, 2002, GTK 2016a)

Pohjavesialueista 3800 on luokiteltu vedenhankintaa varten tärkeiksi tai vedenhankintaan soveltuviksi. Riskialueiksi on luokiteltu 350 aluetta eli niillä alueilla pohjavedessä on todettu haitallisten aineiden pitoisuuksia ja veden tila voi heikentyä ilman suojelutoimia. Riskialueiden määrä on noussut (kartoitus vuonna 2013) noin sadalla alueella vuoteen 2009 verrattuna (kuva 3). Tila on vaarantunut erityisesti Etelä-Suomessa ja taajamissa, joilla on runsaasti ihmistoimintaa. Noin 100 riskipohjavesialuetta on tilaltaan huonoja. Pohjavesien tilalle riskiä aiheuttavat mm. pilaantuneet maa-alueet, teiden talvikunnossapito, aiemmin käytetyt torjunta-aineet, öljytuotteiden varastointi, teollisuusalueet sekä kotieläintalous. (www.ymparisto.fi, 2016)

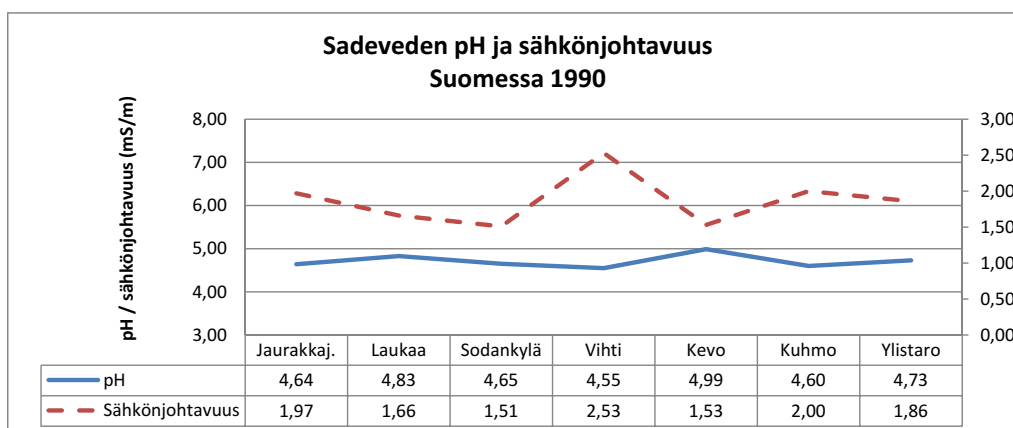


Kuva 3. Pohjavesien tila ja riskialueet 2013.
http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Pohjavesien_tila

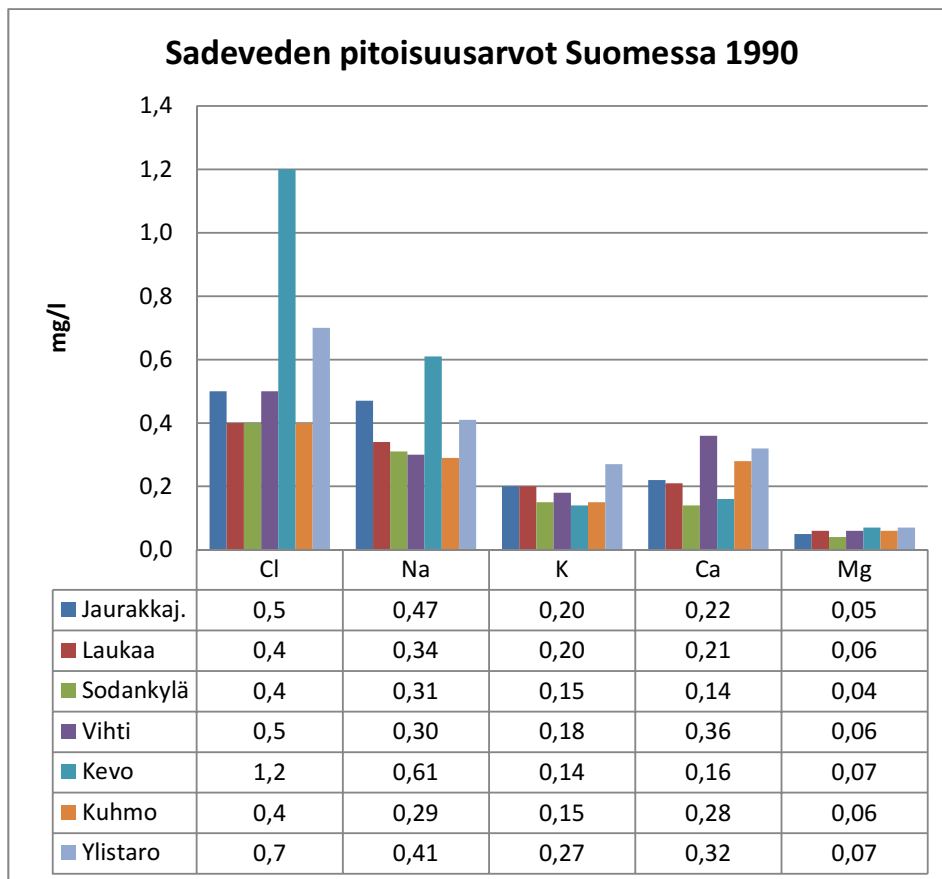


Kuva 4. Liikennealueiden riskiluokitus ja pohjavesialueiden suojelusuunnitelmien tilanne Etelä-Suomessa. Riskiluokituksella kuvataan vaarallisten aineiden kulkeutumisenopeutta maaperässä tien läheisyydessä. Nopeuteen vaikuttavat mm. maaperän läpäisykyky, pohjaveden syvyystaso maanpintaan nähden, maanpinnan viettosuunnat ja jyrkkyys.

Sadanta on tärkein pohjaveden laatuun vaikuttavista ilmastollisista tekijöistä. Suomessa sadevesi on yleisesti hapanta ja niukkasuolaista, mutta ominaisuudet vaihtelevat sekä ajallisesti että paikallisesti. Viime vuosikymmenten aikana rikin ja typen oksidien teolliset päästöt sekä monien raskasmetallien päästöt ilmaan ovat vähentyneet, mikä on vähentänyt myös vesien happamoitumista. Kuvissa 5 ja 6 on esitetty esimerkkinä sadeveden pitoisuuksien arvot muutamilla havaintoasemilla vuonna 1990. (VYH, 1992)



Kuva 5. Sadevesien pH:n ja sähkönjohtavuuden mediaaniarvot muutamilla mittausasemilla Suomessa vuonna 1990. (Aineistot: VYH, 1992)



Kuva 6. Sadevesien pitoisuuksien mediaaniarvot muutamilla mittausasemilla Suomessa vuonna 1990. (Aineistot: VYH, 1992)

Sadeveden laatu muuttuu nopeasti maaperässä kasvillisuuden ja muun orgaanisen toiminnan sekä kemiallisten sitoutumis- ja vapautumisreaktioiden vaikutuksesta. Maaperän huokosveden ominaisuuksia säätelevät mm. kationinvaihto maahiukkasten ja maaveden välillä, alumiini- ja rautayhdisteiden liukeneminen ja mineraalien kemiallinen rapautuminen. Merkittävimmät muutokset pohjavedeksi imeytyvän veden laadussa tapahtuvat heti pinnassa maannoskerroksessa. Sora ja hiekka eivät merkittävässä määrin varastoi suotovesistä ravinteita eikä niillä myöskään ole kykyä vastustaa pohjaveden happamoitumista. Pohjaveden laatuun vaikuttavat lisäksi geologiset tekijät kuten pohjavesimuodostuman rakenne, virtaussuunnat ja maa-aineksen raakoostumus ja huokoisuus. Suomen pohjavedet ovat yleensä hieman happamia, hyvin pehmeitä, niukkasuolaisia ja usein ainakin lievästi metalliputkistoja syövyttäviä. Maa-perän geologinen vaihtelu selittää suuren osan alueellisista vaihteluista pohjavesien pitoisuuksissa Suomessa, mutta myös ihmisen toiminta vaikuttaa pohjavesien laatuun. Meren läheisyys näkyy yleisesti rannikkoalueilla pohjaveden korkeampina sähkön-johtavuusarvoina. Pohjanmaalla ja lounaisrannikolla pohjavesien luontainen sulfaattipitoisuus on korkeampi ja etelä- ja lounaisosissa luontainen alumiinipitoisuus on korkeampi. Alueellisesti paras neutraloimiskyky on lounaisrannikon, Ahvenanmaan ja Peräpohjolan vesissä (kalkkikiviaines) ja heikoin Lapissa. (Rintala, 2014, GTK, 2016b)

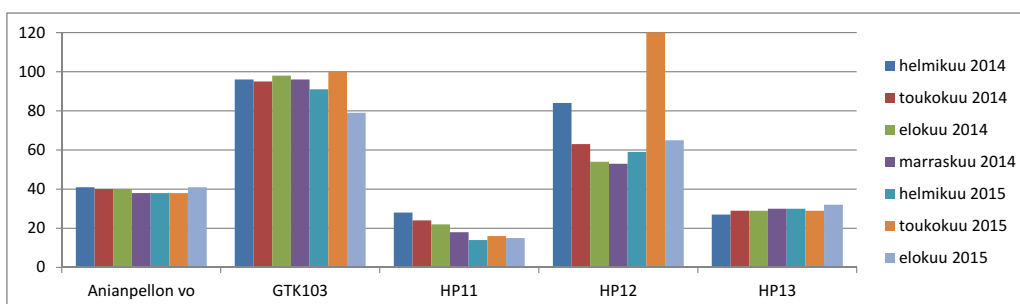
Pohjavesien laatua seurataan säännöllisesti ympäristöhallinnon seurannoissa. Aiemmin seurantoja tekivät sekä SYKE (Suomen ympäristökeskus) että GTK (Geologian tutkimuskeskus), mutta pohjaveden taustapitoisuuksien seurantavastuu siirtyi kokonaan SYKELLE vuonna 2007. SYKE ja GTK osallistuivat vuonna 2006 yhteispohjoismaiseen INFORM-hankkeeseen (INFROM: (Intercalibration of Fennoscandian Reference Monitoring of Groundwater in Finland, Sweden and Norway)), jossa tarkoituksena oli vertailla pohjaveden laatua Pohjoismaissa. Tutkimuksen

analyysitulokset vastaavat tutkimusraportin mukaan melko hyvin pitkäaikaisseurannan ko. kohteissa saatuja tuloksia. INFORM-hankkeen tutkimustuloksia on esitetty taulukossa 2. Lähellä maanpintaa esiintyvää ja vain lyhyen ajan maaperässä viipyvää pohjavettä edustaa hyvin lähteiden ja matalien rengaskaivojen analyysitulokset. Porakaivojen analyysitulokset puolestaan edustavat hyvin kalliopohjaveden laatua. (Hatakka, 2009)

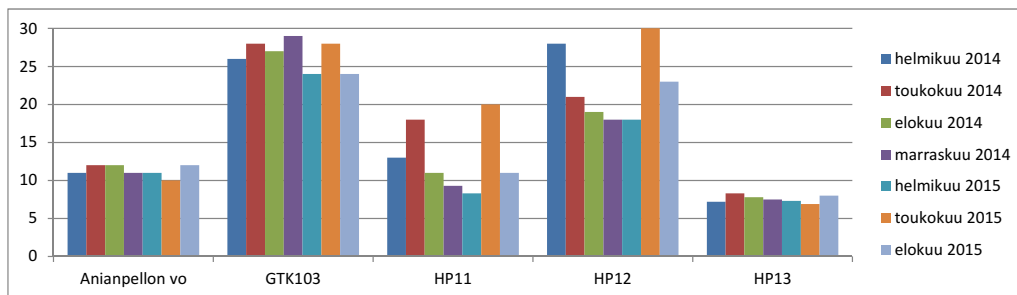
Taulukko 2. *INFORM-hankkeen pohjaveden laadun mediaanit näytepaikkojen mukaan jaoteltuna*

Alkuaine tai ominaisuus/ Element or property	Lähteet ja lähdekaivot Mediaani/ Median	Rengaskaivot ja havainto-putket Mediaani/ Median	Kalliopora-kaivot Mediaani/ Median	Koko aineisto Mediaani/ Median
Näytemäärä	17 - 54	2 - 36	0 - 4	30 - 94
pH, kenttä/ field	6,6	6,6	7,5	6,6
Sähkönj. kenttä, mS/m, 25 °C/ El. conductivity, field	8,2	8,9	19,7	9,0
Lämpötila °C, kenttä/ Temperature, field	5,7	6,7	-	6,0
Happi O ₂ mg/l, kenttä/ field	9,7	7,8	-	9,5
pH, lab./ lab.	6,3	6,3	7,3	6,3
Sähkönj. lab., mS/m, 25 °C/ El. conductivity, lab.	4,9	6,6	19,5	5,6
Piihappo SiO ₂ mg/l	12,8	11,6	13,7	12,7
Alkaliteetti mmol/l/ Alkalinity	0,27	0,32	1,5	0,29
Sulfaatti SO ₄ ²⁻ mg/l	4,8	7,9	8,6	6,1
Kloridi Cl ⁻ mg/l	1,5	2,6	4,9	2,0
Bromidi Br ⁻ µg/l	7,2	0,5	<0,1	6,9
Fluoridi F ⁻ mg/l	<0,1	<0,1	0,1	<0,1
Nitraatti NO ₃ ⁻ mg/l	0,7	0,5	2,1	0,6
Kalsium Ca mg/l	3,9	5,4	25,0	4,4
Magnesium Mg mg/l	1,2	1,5	5,0	1,3
Natrium Na mg/l	2,6	2,7	6,2	2,7
Kalium K mg/l	0,92	1,2	3,1	1,1

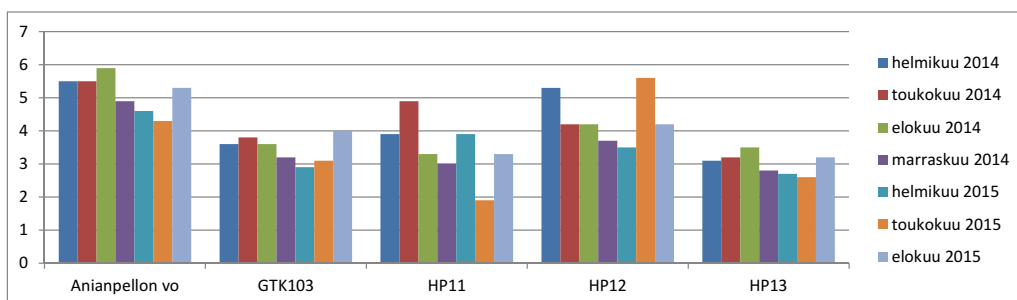
ELY-keskukset seuraavat teiden talvihoidon vaikutuksia pohjavesien laatuun. Anianpellon (vt24) pohjavesialueilla on seurattu Uudenmaan ELY-keskuksen toimesta. Kaliumformiaatin käytön vaikutusta pohjavesien laatuun. Vesinäytteistä on analysoitu eri aineiden pitoisuuksia, pH ja sähkönjohtavuus. Kuvissa 7–10 on esitetty pohjavesien laadunseurannan tuloksia Anianpellon seurannasta vuosilta 2014–2015. Vt24 pohjavesiseurannan kloridipitoisuudet ovat huomattavasti korkeampia kuin INFORM-hankkeen lähteiden ja rengaskaivojen pitoisuudet. Muidenkin analysoitujen aineiden (Na, Ca, Mg ja K) pitoisuudet sekä sähkönjohtavuus ja pH ovat vt24:n mittauksissa olleet korkeampia. Vt24:n näytteistä analysoitiin myös kaliumformiaatin määrä, mutta sen pitoisuudet olivat alle mittausten määrittystarkkuuden eli alle 1 mg/l.



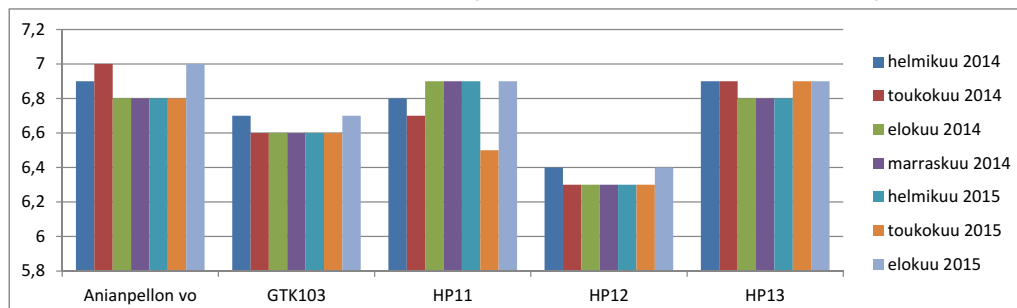
Kuva 7. *Kloridipitoisuuksia (mg/l) Anianpellon kaliumformiaatin käyttöön liittyvässä vedenlaadun seurannassa. Havaintoputket HP11 ja GTK103 sijait sijaitsevat valtatie 24 läheisyydessä ja havaintoputket HP12 ja HP13 seututien 313 varressa. (Aineistot: Uudenmaan ELY-keskus)*



Kuva 8. Natriumpitoisuuksia (mg/l) Anianpellon kaliumformiaatin käyttöön liittyvässä vedenlaadun seurannassa. Havaintoputket HP11 ja GTK103 sijaitsevat valtatie 24 läheisyydessä ja havaintoputket HP12 ja HP13 seututien 313 varressa. (Aineistot: Uudenmaan ELY-keskus)



Kuva 9. Kaliumpitoisuuksia (mg/l) Anianpellon kaliumformiaatin käyttöön liittyvässä vedenlaadun seurannassa. Havaintoputket HP11 ja GTK103 sijaitsevat valtatie 24 läheisyydessä ja havaintoputket HP12 ja HP13 seututien 313 varressa. (Aineistot: Uudenmaan ELY-keskus)



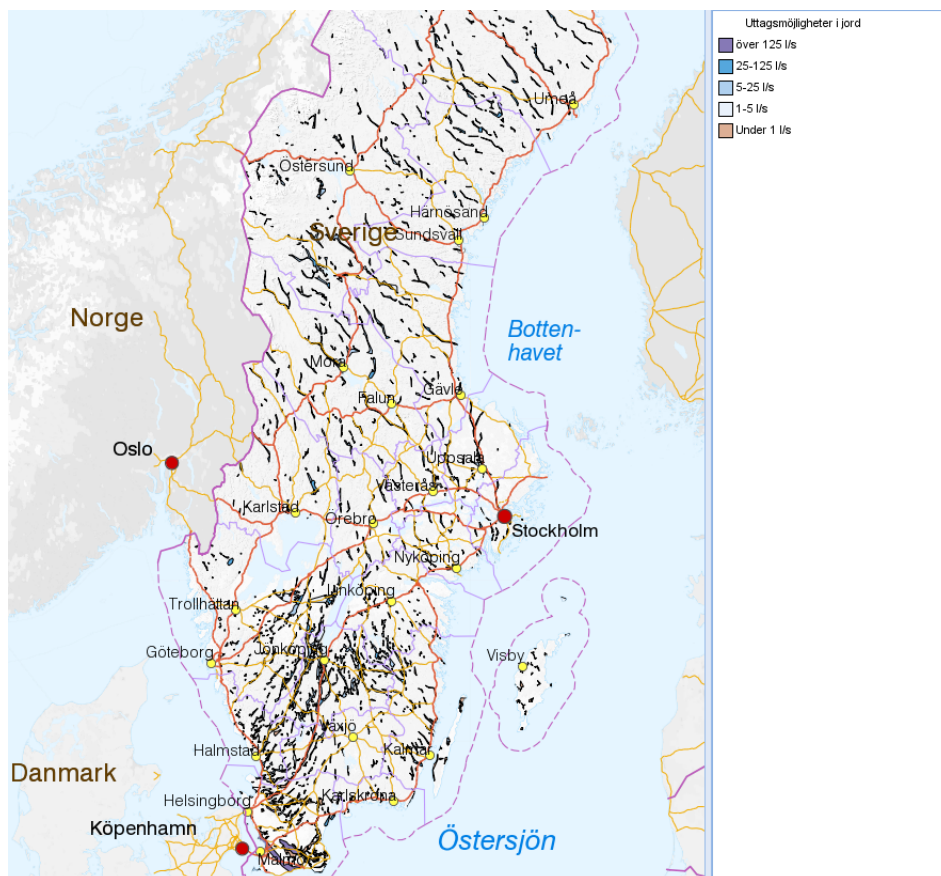
Kuva 10. pH-arvot Anianpellon kaliumformiaatin käyttöön liittyvässä vedenlaadun seurannassa. Havaintoputket HP11 ja GTK103 sijaitsevat valtatie 24 läheisyydessä ja havaintoputket HP12 ja HP13 seututien 313 varressa. (Aineistot: Uudenmaan ELY-keskus)

2.3 Periaatteet Ruotsissa

Ruotsissa pohjavesien suojelun tärkeimpiä keinoja ovat maankäytön suunnittelu, ennakkovalvonta ja yleissääntely sekä vedenhankintakäyttöön tarkoitettujen pohjavesialueiden suojalueet. Tärkeimmät pohjavedensuojelua väylänpidossa koskevat kansalliset säädökset ovat ympäristökaareissa (Miljöbalk 1998:808), tielaissa (Väglag 1971:948), rautatielaissa (Järnvägslag 2004:519) ja rakennuslaissa (Plan- och bygglag 2010:900). Säädösten mukaan kaikessa toiminnassa on muun ohella estettävä ihmisen terveydelle tai ympäristölle aiheutuvien vahinkojen tai haittojen aiheutuminen. Ammatteisessa toiminnassa on lisäksi käytettävä parasta mahdollista tekniikkaa ja vaihdettava ympäristölle haitalliset aineet vähemmän haitallisiin, jos se on mahdollista. Lupa- käsittelyyn liittyy kuitenkin kohtuusharkinta. (Eduskunta, 2014)

Ruotsin hallitus on linjannut 16 ympäristön laadun tavoitetta ihmisten hyvinvoinnin lisäämiseksi ja nykyisten ympäristöongelmien poistamiseksi. Pohjavesien osalta tavoitteeksi on asetettu hyvälaatuinen pohjavesi: kelpaa juomavedeksi, kemiallinen laatu on hyvä, pohjaveden määrä on hyvä, pohjaveden pinnan vaihteluilla ei ole haittavaikutuksia ja luonnon soravaroja suojellaan. Vuonna 2016 on valmistunut laaja vesihuoltokysymyksiä käsitellyt selvitys, jossa merkittävimminä uhkina talousveden saatavuudelle ja hyvälle laadulle tulevaisuudessa nostettiin esille kaupungistuminen ja ilmastonmuutos. Ruotsissa pohjavettä tai tekopohjavettä on noin 50% yhdyskuntien käyttövedestä.

Pohjavesimuodostumien kartoituksesta huolehtii Ruotsin geologinen tutkimuslaitos (Sveriges geologiska undersökning, SGU). Pohjavesiselvityksiä on tehty lääneittäin koko maan osalta. Lisäksi yksittäisiä pohjavesiesiintymiä kartoitetaan paikallisella tasolla. (Eduskunta, 2014) Ruotsissa noin puolet talousvedestä on pohjavettä tai tekopohjavettä. Ruotsalaiset pohjavesiesiintymät ovat yleensä melko pieniä eivätkä ne ole yhteydessä toisiinsa. Skånen alueella on isompia yhtenäisiä pohjavesiesiintymiä. Pohjaveden hankintaan käyttökelpoisimmat geologiset muodostumat ovat jääkauden aikana muodostuneet pitkittäisharjut ja reunamuodostumat. Kalliopohjavedessä saat-
taa olla kohonneita (yli 50 mg/l) suolapitoisuuksia sellaisilla alueilla, jotka ovat olleet aikaisemmin merenpohjaa (meren sekä järvien Mälaren, Hjälmaren ja Vänern lähettävillä). Myös maanteiden liukkaudentorjunta lisää suolaantumisen riskiä, mikä on erityisen haitallista alueilla, joissa pohjavesien luontainen suolapitoisuus on korkea. Ruotsin länsirannikolla pohjaveden luonnollinen kloridipitoisuus on 20 mg/l, Keski-Ruotsissa 5 mg/l ja Etelä-Ruotsissa 5 mg/l. (Vattenportalen 2016, Lundmark 2008)



Kuva 11. Ruotsin pohjavesimuodostumat, kartalla ei ole mukana kalliopohjaveden esiintymät. (SGU, 2016)

Tienpidon ja radanpidon osalta pohjavesien suojelusta vastaa Ruotsissa Trafikverket – Ruotsin liikennevirasto, jolla on vastuullaan valtion teiden ja rautateiden rakentaminen, hoito ja ylläpito sekä tie-, rautatie-, vesi- ja lentoliikenteen toimivuudesta ja turvallisuudesta huolehtiminen. Trafikverketin tievesien ympäristövaikutusten hallinnan linjaukset on esitetty pohjavesien osalta seuraavasti (Trafikverket, 2011)

- Vedenhankintaa varten tärkeät pohjavesialueet suojellaan ympäristölle vaarallisten aineiden onnettomuuksista aiheutuvilta päästöiltä ja valumiselta.
- Tiesuolan haitallista vaikutusta tärkeillä pohjavesialueilla tullaan vähentämään ja ajan mittaan vaikutukset pyritään poistamaan.
- Uusien teiden rakentamisen ja vanhojen teiden korjaamisen yhteydessä arvioidaan sekä pohjavesiin liittyvät riskit että pohjavesialueiden herkkyyks ja arvo.

Tienpidosta aiheutuvat uhkat pohjavesille on Ruotsissa jaettu kolmeen luokkaan: (i) jatkuvat tiestön kulumisesta sekä ajoneuvojen käytöstä ja kulumisesta johtuvat päästöt, (ii) ajoittaiset tiestön kunnossapidosta johtuvat päästöt (esimerkiksi liukkaudentorjunta) sekä (iii) satunnaiset onnettomuuksiin ja vuotoihin liittyvät päästöt. Kaikissa investointi- ja ylläpito-hankkeissa selvitetään tarpeet pohjavesien suojelun toimenpiteille. Toimenpiteistä tehdään tarvittaessa erillinen suunnitelma. Toimenpiteet voivat olla esimerkiksi pohjavesisuojausten rakentaminen tai tiekaiteiden tyyppin vaihtaminen sellaiseksi, että raskaiden ajoneuvojen suostumisonnettomuudet pystytään estämään. Suunnittelun periaatteena on riskien vähentäminen ja hyvä valmiustaso vaarallisten aineiden onnettomuuksien vaikutusten hallitsemiseksi. Käytännössä toimenpiteet voivat olla sekä liikenneturvallisuuden parantamiseen tähtääviä että päästöjen vähentämiseen tähtääviä. Valmiussuunnitelma onnettomuustilanteiden varalle tulee aina olla olemassa.

3 Pohjavesien suojaamisen toimenpiteet

3.1 Toimenpiteet Suomessa

Pohjavesien suojelussa avainasemassa ovat likaantumista ennaltaehkäisevät keinot, koska likaantuneiden pohjavesien puhdistaminen on vaikeaa ja kallista ja pilaantuminen voi heikentää pohjavesien tilaa vielä vuosikymmenienkin päästä. Keinoja hallita ihmistoiminnasta aiheutuvia pohjavesiriskejä ovat mm. pohjavesialueiden suojelusuunnitelmien laatiminen sekä pohjavesialueiden tilan seuranta, toimintojen riskejä vähentävä sijoittaminen, vaihtoehtoisten liukkaudentorjunta-aineiden käyttö tai pohjavesisuojausten rakentaminen.

Pohjaveden suojelusuunnitelmat

Pohjavesien suojelemiseksi tai pohjaveden suojelutoimien tehostamiseksi on laadittu pohjavesien suojelusuunnitelmia maankäytön suunnittelun ja viranomaisvalvonnan tausta-aineistoksi 1990-luvulta lähtien. Suojelusuunnitelmat kattavat koko pohjavesialueen. Suojelusuunnitelman laatimisesta vastaa kunta tai kunnan vesihuoltolaitos ja suojelusuunnitelmien laadintaan ovat osallistuneet myös ELY-keskukset. Suojelusuunnitelmassa esitetään alueen pohjavesiolosuhteet ja riskitoiminnat sekä toimenpiteet, joilla riskejä voidaan vähentää. Suojelusuunnitelman ei ole tarkoitus tarpeettomasti vähentää pohjavesialueiden käyttöä vaan niillä halutaan turvata pohjavesivarojen säilyminen. Parhaillaan ollaan laatimassa ohjeistusta suojelusuunnitelmien laatimisesta. Uuden ohjeistuksen tavoitteena on yhtenäistää suojelusuunnitelmien laatimista ja niiden sisältöä.

Pohjavesien tilan seurannat

Pohjavesien laatua seurataan säännöllisesti ympäristöhallinnon seurannoissa. Seurannalla pyritään saamaan kokonaiskuva pohjaveden tilasta ja havaitsemaan ihmistoiminnasta aiheutuvat muutossuunnat. Pohjaveden taustapitoisuuksien seuranta oli pitkään kahden eri tahon, ympäristöhallinnon ja geologian tutkimuskeskuksen (GTK) vastuulla. Vuonna 2007 pohjaveden taustapitoisuuksien seurantavastuu siirtyi ympäristöhallinnolle. ELY-keskuksilla on seurannassa lisäksi erityiskohteita teiden talvihoidon vaikutusten seuraamiseksi. Lisäksi vesihuoltolaitokset seuraavat pohjaveden ottoa, pinnankorkeutta ja yleensä myös raakaveden laatua vesilain perusteella annettun luvan seurantavelvoitteiden perusteella.

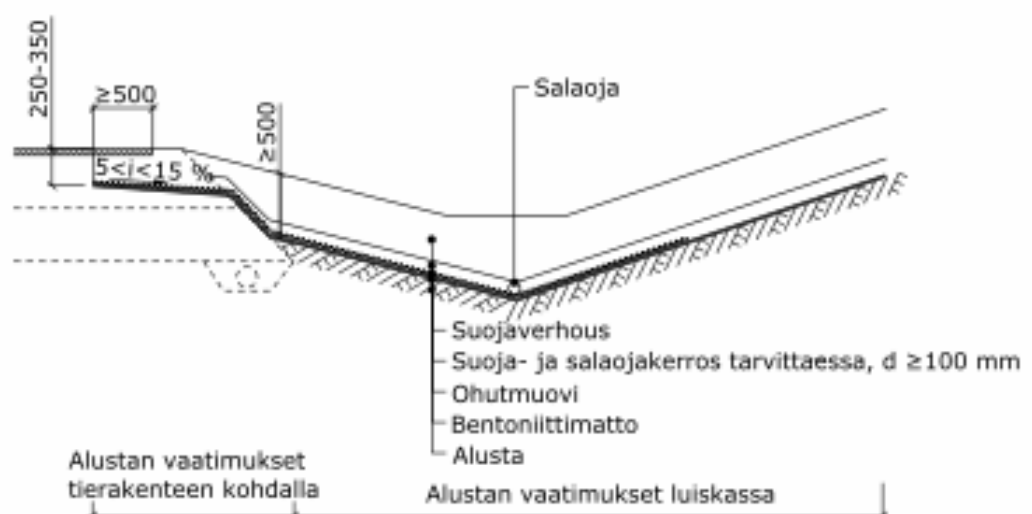
Pohjavesisuojaukset

Liikenteen ja tienpidon aiheuttamien pohjavesiriskien vähentämiseksi maantieverkolle on toteutettu pohjavesien luiskasuojauksia noin 290 km. Ensimmäiset pohjavesisuojaukset rakennettiin 1980-luvulla maatiivisteestä ja geomembraanista ja vuodesta 1993 alettiin rakentaa suojauksia bentoniitista. Noin kymmenen vuotta sitten laadittiin Liikenneviraston nyt voimassa oleva pohjavesisuojausten hankeohjelma, johon suojattavat kohteet valittiin ensisijaisesti teiden riskipisteytyksen perusteella. Riskipisteytykseen vaikuttavat pohjavesialueen luokka ja riskipisteytettävät tie sekä vedenotto ja sen antaa suuruusluokkatiedon tiesuolauksen aiheuttamasta riskistä. Pohjavesisuojausten hankeohjelma on lähes toteutettu ja Liikennevirasto tulee laatimaan uuden pohjavesiriskien toimenpideohjelman lähivuosina.

Toimenpideohjelmaan sisällytetään pohjavesisuojausten toteuttamisen lisäksi myös muut keinot pohjavesiriskien vähentämiseksi, kuten seuranta, vaarallisten aineiden kuljetusten rajoittaminen ja suolauksen vähentäminen. (Liikennevirasto, 2011, SYKE 2016)

Viime vuosina pohjavesisuojauksia on rakennettu pääasiassa suurten kehittämissuhteiden yhteydessä, koska tienpidon rahoitus on ollut niukka. Suojaus rakennetaan uusilla hankkeilla, jos pohjavesialueella on käytössä oleva vedenottamo tai suunniteltu vedenottoalue, pohjaveden virtaus suuntautuu tieltä vedenottamolle tai suunnitellulle vedenottoalueelle ja jos tien suolaus tulee olemaan yli 8 tn/km/v tai vaarallisten aineiden kuljetuksia tulee olemaan yli 100.000 tn/v. Hankkeet, joissa pohjavesisuojaus toteutetaan olemassa olevalle tiestölle, on valittu ensisijaisesti riskipisteytyksen perusteilla. Olemassa olevalle tiestölle hankkeita on toteutettu kesimäärin yksi vuodessa. (Liikennevirasto, 2011, Tiehallinto 2006, Tiehallinto 2004a)

Suomessa maanteillä käytetyt pohjavesisuojausten luokat ja rakenteet on kuvattu Tiehallinnon ohjeessa Pohjavedensuojaus tien kohdalla. Toimintavarmin rakenne on kloridisuojauksessa käytetty yhdistelmä rakenne (kuva 12), joka koostuu mineraalisesta tiivisteestä (bentoniittimatto tai maatiiviste), geomembraanista ja suojaverhouksesta. Maanteiden pohjavesisuojausten yhdistelmä rakenteiden toimivuus perustuu vesien ohjaamiseen tehokkaasti pois suojattavalta alueelta, joten pysyvää vedenpainetta tiivistysrakenteeseen ei kohdistu. Tällaista rakennetta käytetään esimerkiksi tärkeän vedenottamon lähialueella. Kloridisuojauksia kevyempää onnettomuus-suojauksia käytetään, kun tieosuudella käytetään perinteisiä liukkaudentorjunta-aineita selvästi vähemmän kuin 8 tonnia/kilometri vuodessa. Suolan käytön raja ylittyy käytännössä teillä, jotka pidetään ympäri talven sulana eli Is- ja I-talvihoitoluokan teillä. Näitä ovat tyypillisesti moottoritiet, moottoriliikennetiet sekä vilkkaimmat sisääntulotiet ja kehätiet suurten kaupunkien lähiseuduilla. Liikenneviraston pohjavesisuojauksia koskeva ohjeistus tarkistetaan vuosien 2016 ja 2017 aikana. (Tiehallinto, 2004a)



Kuva 12. Pohjaveden suojausrakenne (Tiehallinto, 2004b)

Maanteiden pohjavesisuojausten suunnittelu aloitetaan jo esisuunnitteluvaiheessa, jolloin kerätään olemassa olevat lähtötiedot pohjavesialueista, tehdään suojaus-tarpeen arviointi sekä ohjelmoidaan alustavasti pohjavesialueen maastotutkimukset ja laadun seurannat. Nykyisen ohjeistuksen mukaisesti esisuunnitteluvaiheen tarkas-telut tehdään pohjavesialueen rajauksen mukaisesti. Yleissuunnitteluvaiheessa teh-dään maastotutkimuksia ja esitetään pohjavesisuojausten laajuus. Tiesuunnitelman perusteella määräytyvät tiealueen laajuus, tien sijainti ja tien tasaus sekä pohjavesi-suojausten laajuus ja vaativuusluokka. Pohjavesisuojauksessa käytettävät materiaalit suunnitellaan rakennussuunnitteluvaiheessa tiesuunnitelmassa määrätyn vaativuus-luokan perusteella. Liikenneviraston tutkimuksissa on todettu, että pohjavesisuojaus-ten toimimattomuusongelmat johtuvat ainakin osittain suojausten kattavuuspuutteis-ta. Suojausten riittävän kattavuuden varmistamiseksi on tärkeää, että esi- ja yleis-suunnitteluvaiheessa suunnataan pohjatutkimuksia myös pohjavesialueen laajuuden ja pohjaveden virtaussuuntien tarkemmaksi selvittämiseksi.

Vaihtoehtoisten liukkaudentorjunta-aineiden käyttö

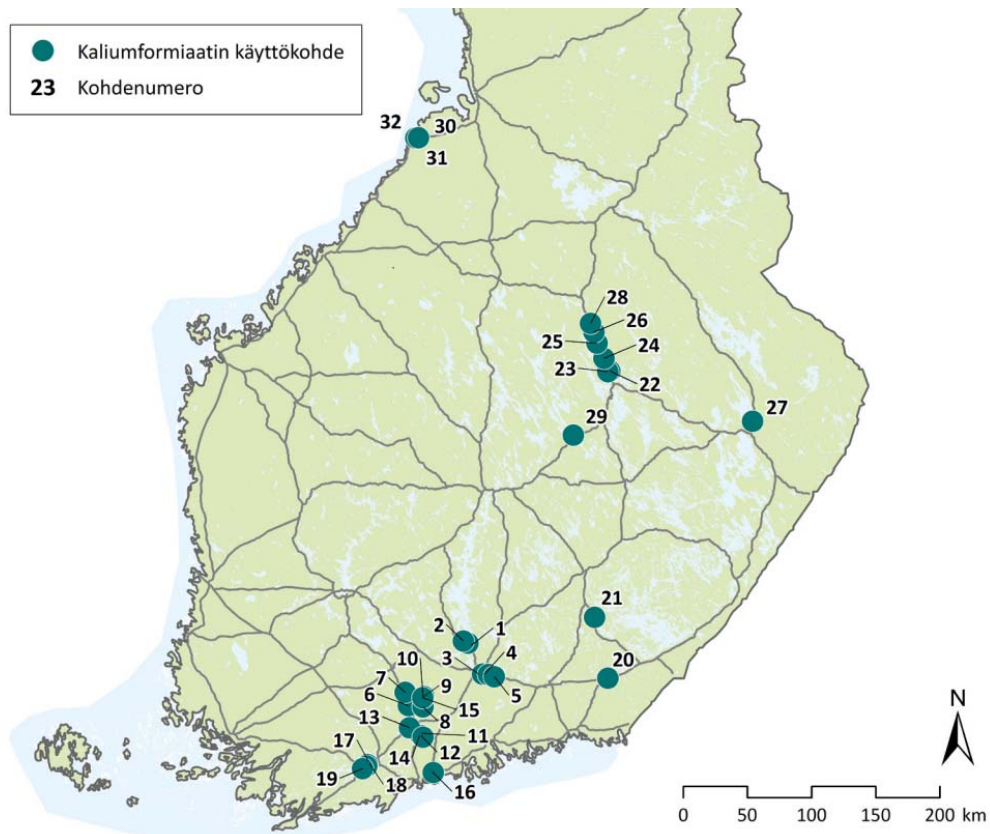
Vaihtoehtoisten liukkaudentorjunta-aineiden käyttöä maanteilla on selvitetty Suo-messa 1990-luvulta lähtien, jolloin selvitettiin yhdysvaltalaisiin kokemuksiin perus-tuen Talvi ja tieliikenne -projektissa kalsiummagnesiumasetaatin (CMA) käyttöön-ottoa liukkaudentorjunnassa natriumkloridin korroosio- ja ympäristöhaittojen vähen-tämiseksi. (Tielaitos, 1992. Tielaitos, 1994.) 1990-luvun lopussa aloitettiin Suomen Ympäristökeskuksessa laaja vaihtoehtoisten liukkaudentorjunta-aineiden ja niiden pohjavesivaikutusten tutkimus (MIDAS-hanke 1998-2004 ja MIDAS2-hanke 2004–2010).

MIDAS-hankkeen tavoitteena oli tuottaa tietoa liukkaudentorjunta-aineiden vaikutuk-sista pohjaveden laatuun sekä löytää vähiten veden laatua muuttavia ja ympäristöä kuormittavia natriumkloridille vaihtoehtoisia aineita. Tutkimuksen taustalla oli huoli liukkaudentorjunta-aineiden aiheuttamista haitoista pohjavedelle – mm. maaperän raskasmetallien liukeneminen, kemikaalijäämät ja orgaanisten aineiden käytöstä ai-heutuva veden happikato sekä pelko vesijohtoverkostojen korroosiosta kloridipitoi-suuksien nousemisen myötä. MIDAS-hankkeessa selvitettiin vuosina 1998–2000 nat-riumkloridille vaihtoehtoisia liukkaudentorjunta-aineita – kalsiumkloridia (CaCl_2), magnesiumkloridia (MgCl_2), kaliumformiaattia ja kalsiummagnesiumasetaatia sekä vuoden 2001 osalta myös kaliumasetaatia. Kloridit valittiin kokeisiin, koska haluttiin selvittää, onko niillä keskenään eroja. Orgaanisiksi liukkaudentorjunta-aineiksi valit-tiin kalsiummagnesiumasetatti ja kaliumasetatti ja kaliumformiaatti, koska haluttiin saada lisää tietoa niiden kulkeutumisesta ja hajoamisesta maaperässä sekä keskinäi-sistä eroista. Tutkimuksen perusteella kaliumformiaatti osoittautui lupaavimmaksi vaihtoehtoiseksi liukkaudentorjunta-aineeksi herkille pohjavesialueille viiden tutkitun kemikaalin joukosta. (Hellstén et.al., 2002)

MIDAS-hankkeen tutkimuksia jatkettiin MIDAS2-hankkeessa Suomenniemen kunnassa Kauriansalmen pohjavesialueella. MIDAS2-hankkeen rinnalla Tiehallinto teki omia kaliumformiaatin käyttökokeiluita Luumäen Taavetin ja Kontiolahden Jaamankankaan pohjavesialueilla. Lisäksi Uudenmaan tiepiiri otti kaliumformiaatin kokeiluluonteisesti käyttöön Vantaan Fazerilassa talvihoitokaudella 2004–2005 hankkiakseen käyttökokeiluja ennen liukkaudentorjunta-aineen laajempaa käyttöön ottoa. Tutkimuksen ja käyttökokeiluiden perusteella kaliumformiaattia suositeltiin käytettäväksi vaihtoehtoisena liukkaudentorjunta-aineena herkillä pohja-vesialueilla. (SYKE, 2010) Muutamina viime vuosina kaliumformiaatti on otettu

laajamittaisemmin käyttöön maanteiden liukkaudentorjunnassa. Talvihoitokaudella 2014–2015 kaliumformiaatti on ollut käytössä 32 tieosuudella Uudenmaan, Pohjois-Savon ja Pohjois-Pohjanmaan ja Kaakkois-Suomen ELY-keskusten alueella yhteensä noin 100 ajoratakilometrillä. (Liikennevirasto, 2016)

Tiehallinto on tutkinut 2000-luvun alussa liukkaudentorjunnassa käytetyn kalsiumkloridin (CaCl_2) sivuvaikutuksia. Selvityksessä todettiin, että natriumkloridi (NaCl) ja kalsiumkloridi toimivat yhtä tehokkaasti liukkaudentorjunnassa tavanomaisissa käyttölämpötiloissa (yli -7°C). Lisäksi todettiin, että kalsiumkloridin vaikutukset luonnonympäristöön ovat hieman pienemmät kuin natriumkloridilla, mutta kalsiumkloridin vaikutukset rakennettuun ympäristöön ovat hieman suuremmat kuin natriumkloridilla. Selvityksessä todettiin myös, että kalsiumkloridin käyttö bentoniitista rakennettujen pohjavesisuojausten kohdalla saattaa aiheuttaa natriumbentoniitin ioninvaihtoreaktion, jossa kalsium korvaa natriumin bentoniitin kemiallisessa rakenteessa, mistä johtuen bentoniittisen tiivistyskerroksen vedenläpäisevyys kasvaa. Ioninvaihtoreaktiosta johtuen kalsiumkloridia ei tulisi käyttää liukkaudentorjunnassa kohteilla, jossa pohjavesisuojaus on rakennettu bentoniitista. (Tiehallinto, 2006)

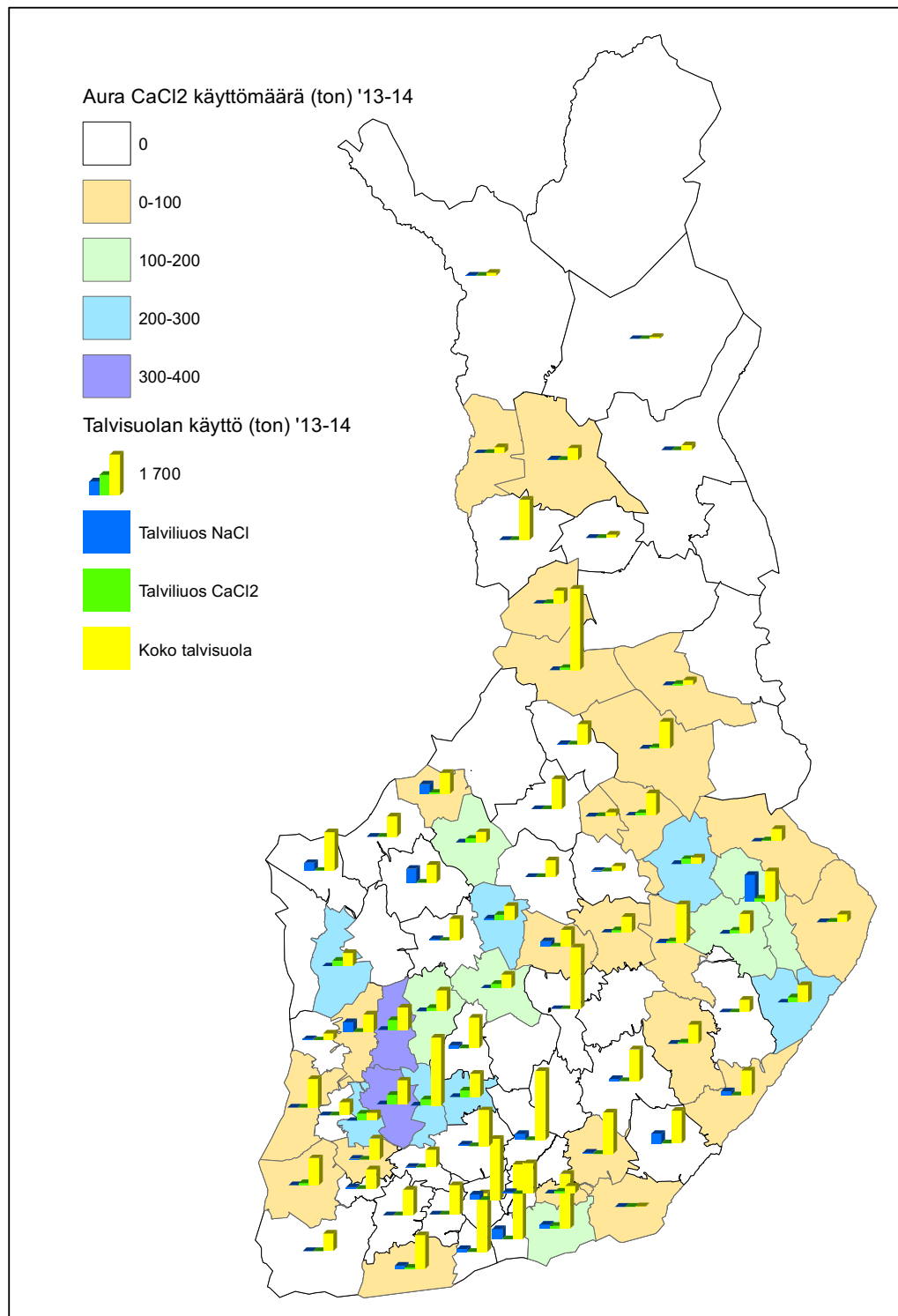


Kuva 13. Talvihoitokaudella 2014–2015 kaliumformiaatti on ollut käytössä Uudenmaan, Pohjois-Savon, Kaakkois-Suomen ja Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskusten alueella yhteensä 32 kohteessa (Liikennevirasto, 2016).

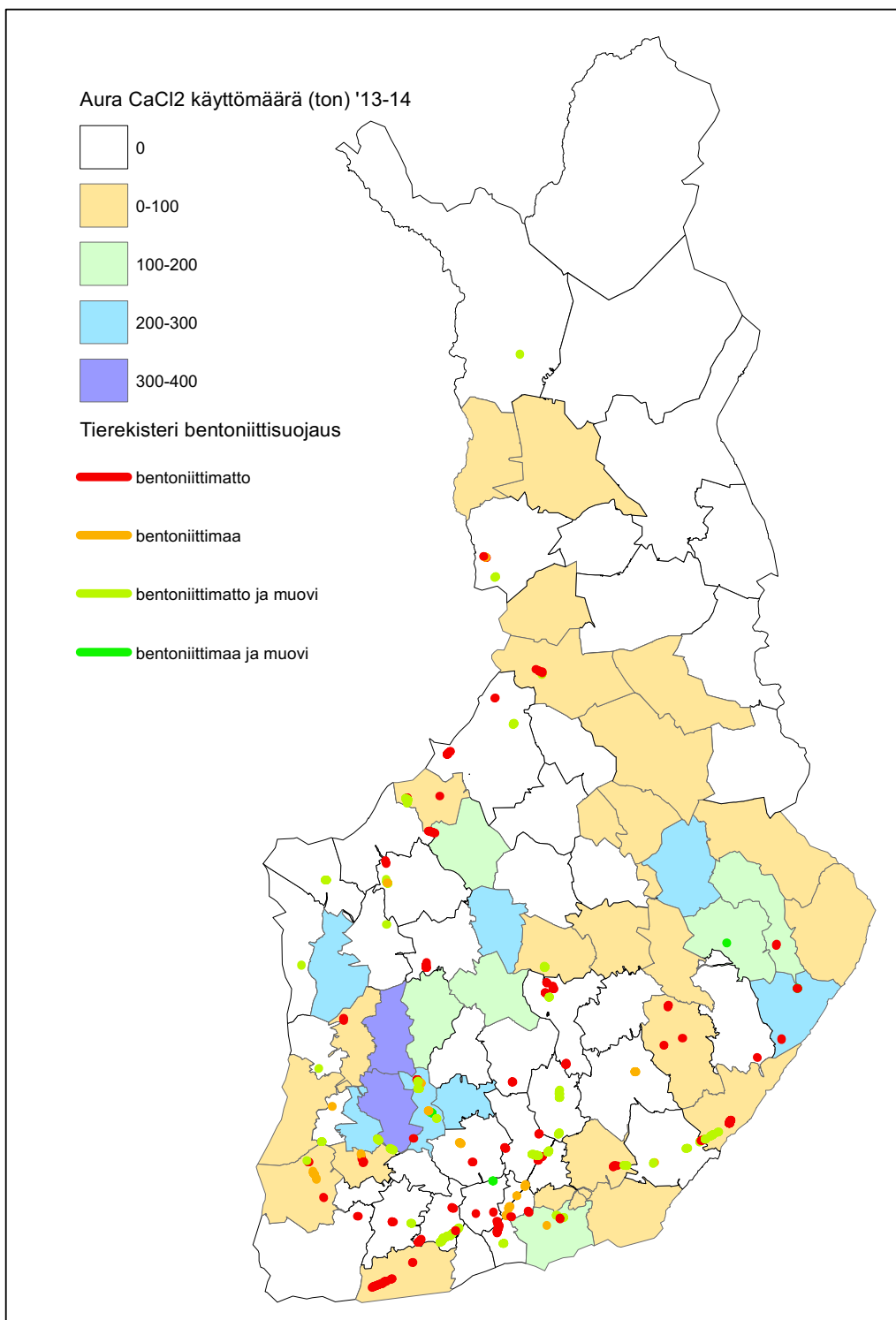
Liikennevirasto seuraa mm. liukkaudentorjunta-aineiden käyttöä maanteiden talvihoidossa Aura-järjestelmän avulla, jonne hoidon alueurakoitsijat raportoivat toteutuneet käyttömäärät urakoissa tieluokittain. Jatkossa hoitourakoissa tullaan siirtymään ajantasaiseen suolankäytön seurantaan. Liukkaudentorjunta-aineiden käyttömäärät vaihtelevat vuosittain sääolosuhteiden mukaan – esimerkiksi talvihoitokausina 2012–2013 ja 2013–2014 talvisuolan kokonaiskäyttömäärä on ollut noin 80 000 tonnia, kun taas talvikautena 2014–2015 talvisuolan kokonaiskäyttömäärä oli

noin 110 000 tonnia. Kalsiumkloridia käytetään liukkaudentorjunnassa ainoastaan liuksena pienellä annostuksella mustan jään torjumisessa sekä rakeisen natriumkloridin kostuttamiseen. Kalsiumkloridin osuus suolan kokonaiskäytöstä voi olla joissain urakoissa hyvinkin suuri (yli 30%), mutta niissä urakoissa on suolan kokonaiskäyttö-määrä ja kalsiumkloridin käyttö tonnimäärä käytännössä pieni. Kuvassa 14 on esitetty talvisuolan (kokonaismäärä, sekä rakeinen että liuosmainen suola), natriumkloridiliuoksen ja kalsiumkloridiliuoksen käyttömäärät talvikaudella 2013–2014 urakoittain. (Aineistot: Aura-järjestelmä)

Kalsiumkloridin käyttö on riski bentoniittisten pohjavedensuojusrakenteiden toimivuudelle. Kuvassa 15 on esitetty kalsiumkloridiliuoksen käyttömäärät talvikaudella 2013–2014 urakoittain ja bentoniittiset pohjavedensuojusrakenteet tierekisterin mukaan. Karttatarkastelun perusteella voidaan todeta, että joidenkin hoitourakoiden alueella sekä käytetään muihin urakoihin nähden suhteessa tonnimääräisesti paljon kalsiumkloridia liukkaudentorjunnassa, että on tierekisterin mukaan pohjavedensuojusrakenteita, joissa tiivistysrakenteena tai osana sitä on bentoniittimatto tai bentoniittimaa. Maanteiden talvihoidon yleisessä viherhoidon ohjeistuksessa on pohjavesisuojausten osalta korostettu rikkakasvien torjunta-aineiden käytön rajoittamista ja tavihoidon ohjeistuksessa (menetelmätieto, laatuvaatimukset ja toimintalinjat) on pohjavesien osalta korostettu tiesuolan ympäristövaikutuksia. Kalsiumkloridin käyttökieltoa bentoniittista rakennetuilla pohjavesisuojausalueilla ei ole hoidon yleisissä ohjeistoissa esitetty. Alueurakoiden työkohtaisissa tarkennuksissa saattaa kuitenkin olla tiukkojakin rajoituksia suolan käytölle. (Suolausta koskevat aineistot: Aura-järjestelmä, Pohjavesisuojausrakenteet: Tierekisteri)



Kuva 14. Talvisuolan (kokonaismäärä, sekä rakeinen että liuosmainen suola), natriumkloridiliuoksen ja kalsiumkloridiliuoksen käyttömäärät talvikaudella 2013–2014 urakoittain.



Kuva 15. Kalsiumkloridiliuoksen käyttömäärät talvikaudella 2013–2014 urakoittain ja bentoniittiset pohjavedensuojusrakenteet tierekisterin mukaan.

Pohjavedensuojaurakenteiden toimivuus

Luiskasuojauksen rakentamisella pyritään estämään sekä liukkaudentorjunta-aineiden että onnettomuustapauksissa kemikaalien ja polttonesteiden kulkeutumista pohjaveteen. Tavoitteena on ensisijaisesti johtaa vesi pois pohjaveden muodostumisalueelta ja toisaalta pidättää haitta-aineita ennen niiden joutumista pohjaveteen. Pohjavesialueiden kloridisuojauksessa rakenteen tehokkuus perustuu siihen, että tiivistyskerroksen materiaalit (bentoniittimatto tai maatiiviste ja geomembraani) läpäisevät eri tavoin haitta-aineita ja parantavat toisensa pitkäaikaiskestävyyttä. Kloridi-ionit eivät pääse läpi geomembraanista, joten kulkeutumista voi tapahtua vain geomembraanissa olevien reikien kautta. Mineraalinen tiivistyskerros pidättää haitta-aineita, mutta kloridi-ionit kulkeutuvat tehokkaasti diffuusiivisesti mineraalisen tiivistyskerroksen läpi. Suotautuminen tapahtuu kuitenkin vain vauriokohtien kautta eikä koko mineraalisen tiivistyskerroksen pinta-alalta, koska pysyvää vedenpainetta tiivistysrakenteen päällä ei ole.

Mineeraalisen tiivistyskerroksen sisältävän suojaurakenteen toimivuuteen vaikuttavat ensisijaisesti suojauksen kattavuus, vedenpaine korkeus tiivistysrakenteen päällä kuormitustilanteessa, tiivistysmateriaalin vedenläpäisevyys sekä tiivistyskerroksen paksuus. (VTT, 1999) Aiemmissa selvityksissä on todettu, että suunnittelun ohjeistuksesta ja laadukkaista materiaaleista huolimatta rakennettu pohjavesisuojaus ei ole kaikissa kohteissa toiminut odotetulla tavalla. (Hämäläinen et.al., 2005) On arvioitu, että pohjavesisuojaurakenteiden toimivuuspuutteet johtuvat todennäköisesti useimmiten kuivatuksen suunnittelussa tai rakenteiden toteutuksessa tehdyistä virheistä eikä niinkään nykyisten ohjeiden mukaisten suojaurakennetyyppien puutteista. Suojaurakenne toimii todennäköisimmin niissä kohteissa, joissa suojaustyyppi on valittu oikein, suojauksen kattavuus on riittävä eikä kohteen läheisyydessä ole muuta kloridipitoisuuksien nousua aiheuttavaa toimintaa. (Liikennevirasto 2015b)

Aiemmissa selvityksissä ja pohjavesisuojausten kuntokartoituksissa havaittuja tyypillisiä suunnittelun ja rakentamisen aikaisia ongelmia ovat kuivatuksen suunnittelun ja kuivatusjärjestelmien toteuttamisen virheet, ohutmuovikalvolle (eli geomembraanille) ja mineraaliselle tiivistyskerrokselle haitallisten materiaalien käyttö rakentamisessa, läpivientien sijoitus rakenteessa epäedulliseen kohtaan, epäonnistumiset läpivientien tiivistämisessä sekä puutteet tiivistysrakenteen alustan tiivistämisessä ja tasaamisessa. Pohjavesialueen rakennetta ja virtausolosuhteita ei hankkeissa aina tunneta riittävän tarkasti, mikä saattaa osaltaan johtaa kattavuuspuutteisiin suojauksen suunnittelussa ja toteuttamisessa. On esitetty asiantuntija-arvio, että hankkeissa tulisi tehdä jo yleissuunnitteluvaiheessa pohjavesisuojausten suunnittelua varten nykyistä perusteellisemmat pohjatutkimukset, joissa selvitetäisiin nykyistä tarkemmalla tasolla mm. pohjavesialueiden rajausta, vettä hyvin johtavien maakerrosten paksuudet sekä veden virtaussuunnat.

Hoidon ja käytön aikana pohjavedensuojaurakenteisiin vaurioita aiheuttavat tyypillisesti kasvien juuret, suistumisonnettomuudet, kuivatuksen kunnossapidon laiminlyönnit (laskuojat, rummut, kasvillisuus), luiskasortumat, eroosiovauriot, liikenne-merkkien pystytys tai johtojen ja kaapeleiden asentaminen pohjaveden suojaurakenteeseen. Hoidon ja käytön aikaisten vaurioiden korjaaminen tiivistysrakenteissa on vaikeaa eikä rakenteesta useinkaan saada korjaamalla täysin vesitiivistä.

Puutteelliset ja päivittämättömät suunnitteludokumentit ja pohjavesisuojausten kuvaukset haittaavat pohjavesisuojausten päivittäistä kunnossapitoa ja esimerkiksi pohjavesisuojausten kunnon kartoittamista. Myös pohjavesisuojausten maastoon merkitsemisessä on puutteita.

3.2 Esimerkkejä pohjavedensuojaustoimenpiteistä Ruotsista

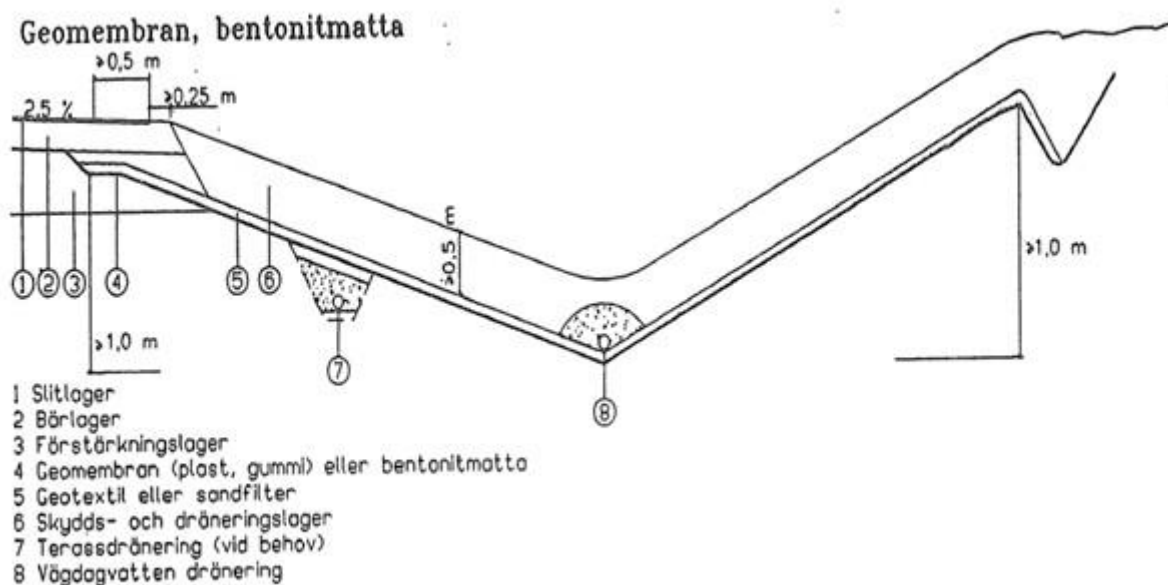
Ruotsissa hankkeilla toteutettavat pohjavesien suojaamisen toimenpiteet suunnitellaan riskien arvioinnin perusteella. Arvioinnissa otetaan huomioon tienpidosta ja liikenteestä aiheutuva kuormitus, ympäristön herkkyys, vesialueen tärkeys ja erityispiirteet sekä rakenteen ylläpito ja hoito (myös onnettomuustilanteissa). Toimenpidesuunnittelu etenee seuraavasti (Vägverket, 2003, Trafikverket, 2011):

- Riskien kuvaus (mm. liikennemäärä, raskaiden ajoneuvojen määrä, vaarallisten aineiden kuljetusten määrä)
- Suojeltavan vesistön kuvaus (tyyppi, suojeluarvot, herkkyys)
- Riskit pohjavesille tieympäristön ulkopuolella
- Hulevesien johtaminen tiealueelta
- Toimenpidetarpeen arviointi (arvioidaan mm. pohjavesisuojauksen rakentaminen, kuivatusjärjestelyt, suodatusjärjestelyt, hulevesialtaan rakentaminen ja hulevesien käsittely, veden virtausten rajoittaminen, eroosiosuojauksen rakentaminen)
- Rakentamiskustannukset, kunnossapitokustannukset
- Tavoitteet pohjavesien suojelemiseksi, mittarit toimenpiteiden onnistumisen seuraamiseksi

Toimenpidevaihtoehtoja ovat mm. suolauksen vähentäminen, lumenpoiston tehostaminen, luiskien tiivistäminen luonnonmaalla, tiivistysrakenne, hulevesien johtaminen pohjavesialueen ulkopuolelle (reunakivet ja vesien johtaminen alueen ulkopuolelle) sekä näiden yhdistelmät. Onnettomuusriskiä pienentäviä keinoja voivat olla nopeuden alentaminen, liikenteen rajoittaminen, suistumisturvallisuuden parantaminen (reunaympäristön pehmentäminen, suistumisten estäminen kaiteilla ja valleilla).

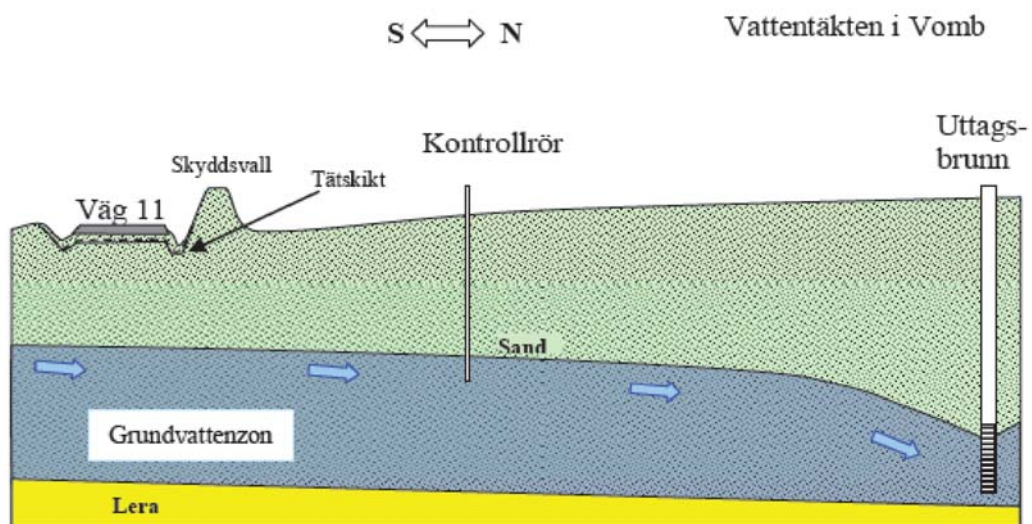
Ruotsissa on tutkittu 1990-luvulla vaihtoehtoisia liukkaudentorjunta-aineita. MINSALT-projektissa (MINSALT: MINSALT – a 5-year study to minimize the negative effects of salt) selvitettiin useiden vaihtoehtoisten liukkaudentorjunta-aineiden käyttöä sekä laboratorioissa että käytännön kokein. Erityisesti selvitettiin kalsium magnesium asetaatin (CMA) käyttöä liukkaudentorjunnassa. Muita tutkittuja aineita olivat kalsiumkloridi, urea, natriumformiaatti ja kaliumasetaatti. Tutkimuksen mukaan suurin hyöty CMA:n käytöstä olisi korroosion väheneminen. (VTI 1991)

Teiden rakenteellisia pohjavesisuojauksia on ilmeisesti toteutettu Ruotsissa vain vähän. Kuvassa 16 on esitetty kaaviokuva tiivistysrakenteesta. Rakenne saman tapainen kuin Suomessa käytetty. Tiivistyskerroksena on kuitenkin vain yksinkertainen tiivistystuote - kumikalvo, muovikalvo tai bentoniittimatto. Tiivistyskerros on limitetty 0,5 m päällysteen alle ja ulkoluiskassa vähintään 1 m korkeammalle kuin tiivistyskerroksen alin kohta. Tiivistyskerroksen päällä on ohut hiekkakerros tai suoja-geotekstiili ja niiden päällä suoja- ja kuivatuskerros. Tiivistysrakenteen alimmassa kohdassa on salaoja johtamassa vedenpainetta pois tiivistyskerroksen päältä.

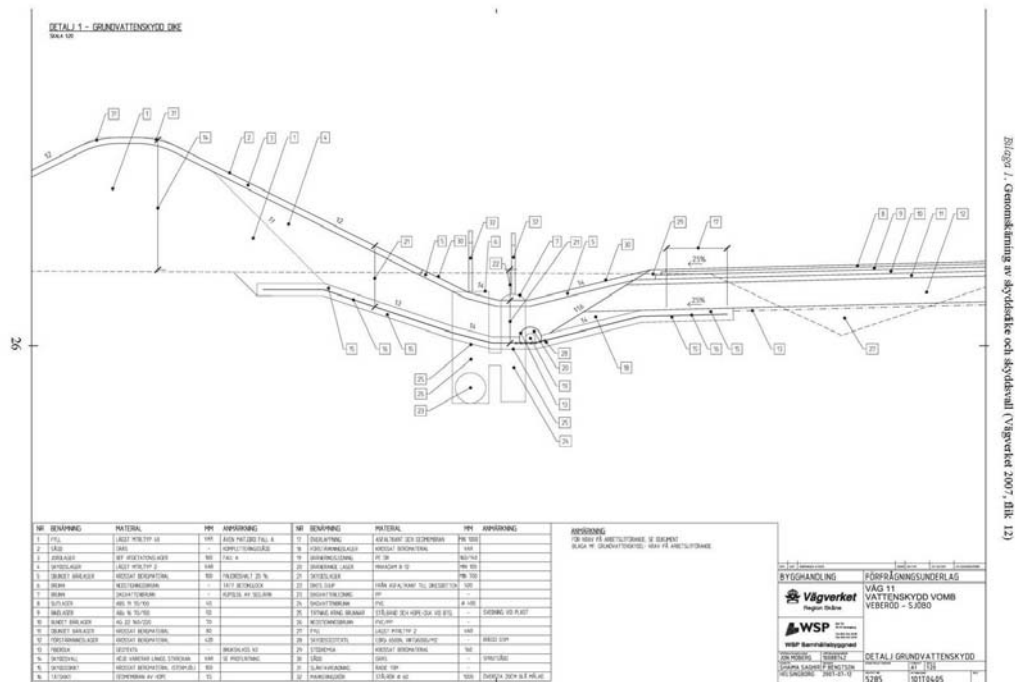


Kuva 16. Pohjavesisuojaus esimerkkirakenne

Kuvassa 17 on esitetty esimerkki toteutetusta tiivistysrakenteesta Vombin tekopohjavedenottamon läheisyydessä maantiellä 11. Rakenteen tarkempi poikkileikkaus on esitetty kuvassa 18. Suojausrakenteet ja tien levittäminen sekä keskikaiteiden rakentaminen toteutettiin vuosien 2008–2009 aikana.



Kuva 17. Esimerkkirakenne pohjavesisuojauksista Ruotsista. Maantie 11, Vombin pohjaveden suojelualue. Yleiskuva. (Holm, 2011)



Kuva 18. Esimerkkirakenne pohjavesisuojuksista Ruotsista. Maantie 11, Vombin pohjaveden suojelualue. Rakenteellinen poikkileikkaus. (Holm, 2011)

Esimerkki toimenpiteistä E4-maantiellä Bergåsenin kohdalla

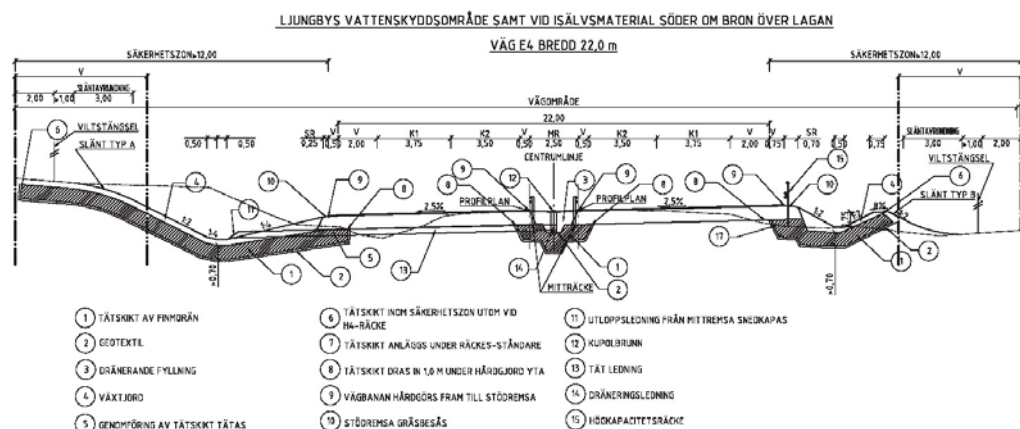
E4 -tielle Bergåsenin kohdalle toteutettiin vuonna 2005 1,7 km:n mittainen yksinkertainen pohjaveden suojausrakenne, jossa veden pääsy ojaan rajoitetaan betonisella reunakivellä ja hulevedet kootaan sadevesiviemäröinnillä tiivispohjaiseen altaaseen ja johdetaan edelleen Lagan -jokeen. Toimenpiteet toteutettiin Bergåsenin pohjavesialueen suojelemiseksi. Växjön ja Alvestan kunnat käyttävät Bergåsenin pohjavettä vedenottoon vuodesta 2009 alkaen ja se on lisäksi varattu tulevaa vedenottoa Ljungbyn kunnalle. (Lundmark et.al., 2007, Trafikverket 2016)

VTI (VTI: Statens väg- och transportforskningsinstitut, ruotsalainen valtion tie- ja liikennetutkimusinstituutti) teki pohjavesisuojuksella tutkimuksia, joissa tavoitteena oli selvittää liukkaudentorjunta-aineiden leviämismekanismeja ja järjestelyjen vaikutusta haitta-ainekuormituksen määrään tieympäristössä. Tutkimuksen mukaan E4:lla käytettiin talvella 2005–2006 marras-maaliskuun aikana liukkaudentorjunta-ainetta yhteensä 14 tonnia/km. Veden kerääntymisen ja laadun mittaukset tehtiin yhteensä kolmen periodin aikana tammikuussa, helmikuussa ja maaliskuussa. Tammi- ja helmikuun mittausperiodeilla hulevesijärjestelmään päätyi mittausten mukaan noin 85 % tielle levitetystä suolamäärästä, mutta maaliskuun mittausperiodilla hulevesijärjestelmään päätyi vain noin 25 % tielle levitetystä suolamäärästä eli varsin pieni osuus. Tutkimuksessa todettiin, että järjestelyn mittaasepävarmuus on varsin suuri eikä yleisiä johtopäätöksiä hankkeelle toteutettujen toimenpiteiden toimivuudesta voida aineiston perusteella tehdä. (Lundmark et.al., 2007)

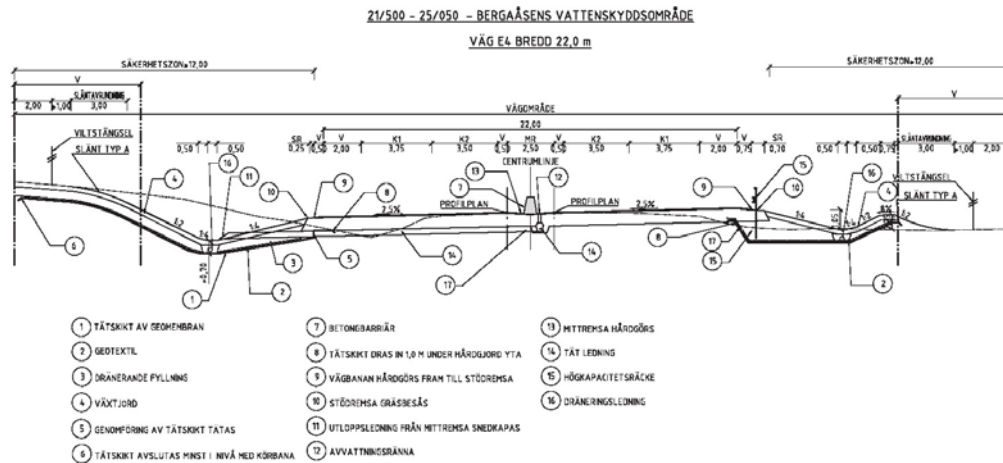


Kuva 19. Bergaåsenin pohjavesialueella toteutettiin pohjavesisuojaus betonisella reunakivellä sekä hulevesiallas. Vedet johdetaan Lagan-jokeen (Lundmark et.al., 2007)

E4:n rakentamista moottoritieksi ko. osuudella ollaan parhaillaan suunnittelemassa ja toteutus on ohjelmassa vuosien 2018-2021 aikana. Hankkeesta on laadittu tie-suunnitelma ja ympäristövaikutusten arviointi. Suunnitelmaan on sisällytetty riskien arvioinnin perusteella suunnitellut pohjavedensuojausratkaisut pohjavesialueiden kohdalla. Tien liikennemäärä on noin 12 000 ajon/vrk ja sen ennustetaan kasvavan vuoteen 2040 mennessä noin 18 000 ajon/vrk. Tie kuuluu vaarallisten aineiden kuljetusverkkoon ja tiellä kuljetetaan noin 20 000–50 000 tonnia vaarallisia aineita vuodessa. Bergaåsenin pohjavesialueen kohdalla maaperä tien kohdalla on hyvin vettä läpäisevää ja pohjaveden virtaussuunta on tieltä vedenottamoille päin. Kuvan 20 mukainen ratkaisu on mitoitettu niin, että mahdollisuuden onnettomuuden sattuessa suojaus pidättää vaarallisia aineita 9 tunnin ajan. Kuvan 21 mukaisessa ratkaisussa tiivistyskerros viedään niin syväälle, että se ei vaurioidu suistumisonnettomuudessa (rakennepaksaus tiivisteen päällä ojan pohjalla 0,70 m). (Trafikverket, 2016)



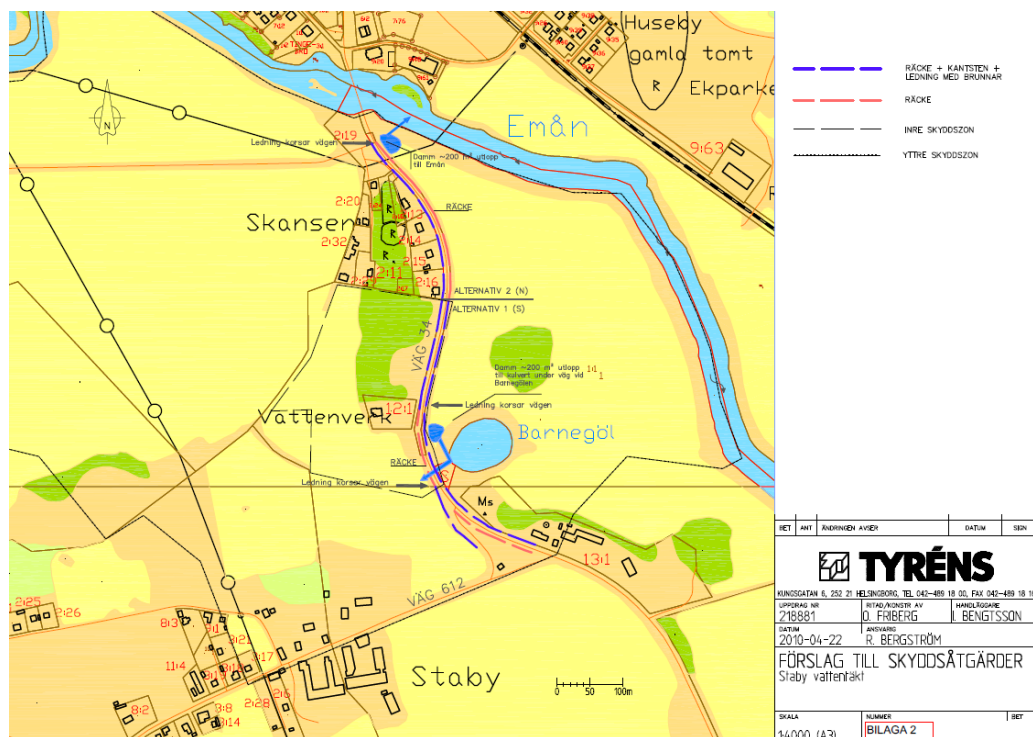
Kuva 20. E4:n rakentaminen moottoritieksi osuudella Ljungby-Toftnäs, rakenteen tiivistyskerros on hieno moreeni, lisäksi toteutetaan korkealuokkainen tiekaide



Kuva 21. E4:n pohjavedensuojausrakenne pohjavedenottamon suoja-alueella, rakenteen tiivistyskerros on geomembraani, lisäksi toteutetaan korkea-luokkainen tiekaide

Esimerkki suunnitelluista toimenpiteistä 34-maantiellä Stabyn kohdalla

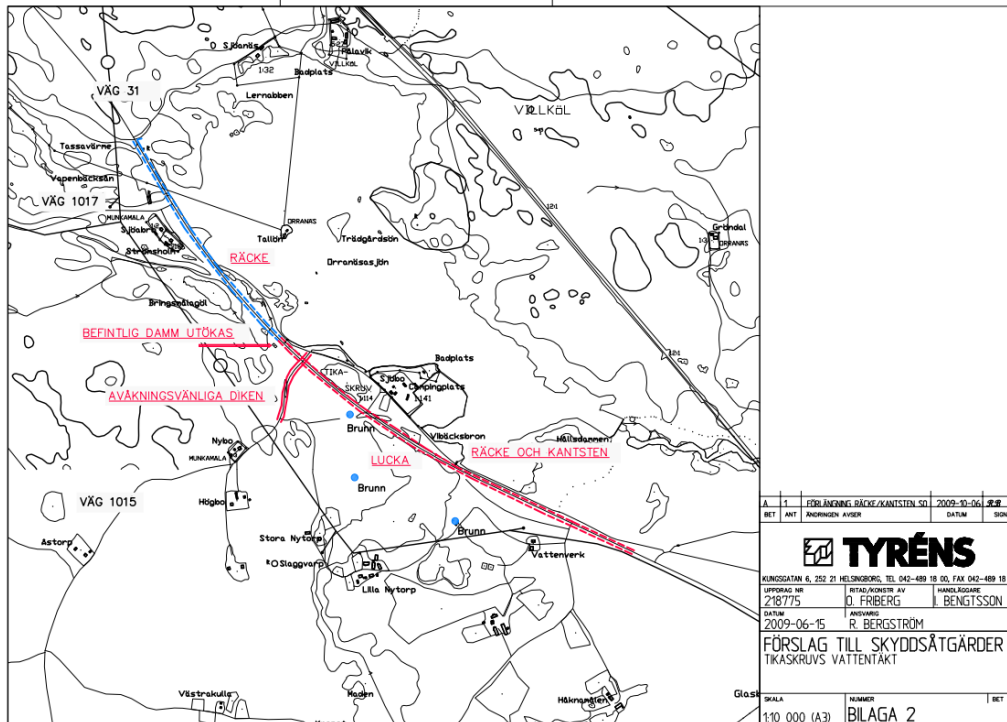
Trafikverket laati vuonna 2013 selvityksen Stabyn vedenottamon suojelemiseksi tieltä tulevilta hulevesiltä. Stabyn pohjavesialueella on noin 3500 asukkaan Högsbyn kunnan pohjavedenotto. Pohjavesialueelle on laadittu suojelusuunnitelma ja maantie kulkee myös pohjavesialueen sisemmän suoja-alueen läpi. Vuoden 2013 selvityksessä ehdotettiin suojelutoimenpiteiksi kuvan 22 mukaisesti reunakivien ja tiekaiteen rakentamista 250 m matkalle ja luiskien tiivistämistä 750 m matkalta sekä 200 m²:n hulevesialtaan rakentamista. Pohjavesialueen suojaamiseksi tien luiskiin oli aiemmin 1980-luvun loppupuolella asennettu PVC-geomembraani. Hankkeen jatkosuunnitteluvaiheissa toimenpiteitä on tarkennetun riski- ja kustannushyötyarvion myötä jouduttu toimenpiteiden kustannusarvion kasvamisen ja rahoituksen riittämättömyyden vuoksi karsimaan. Hankkeelle tullaan toteuttamaan vuonna 2015 tehdyn selvityksen mukaan ainoastaan H2-tyyppisen (kaidetyyppi H2 kestää paremmin raskaiden ajoneuvojen törmäykset kuin tavanomainen tiekaide) tiekaiteen rakentaminen 320 m matkalle. (Trafikverket, 2015a)



Kuva 22. Vesien hallinnan toimenpiteistä 34-maantiellä Stabyn kohdalla

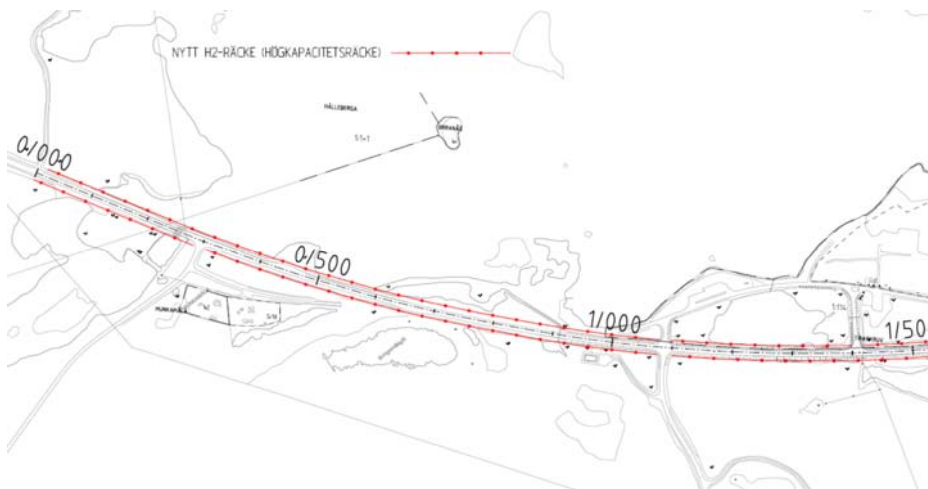
Esimerkki suunnitelluista toimenpiteistä 31-maantiellä Nybron kohdalla

Trafikverket laati vuonna 2013 selvityksen Tikasruvin vedenottamon suojelemiseksi tieltä tulevilta hulevesiltä. Tikasruvin pohjavesialueella on noin 1500 asukkaan pohja-vedenotto Nybron kunnassa ja maantie kulkee myös vedenottamon sisemmän suo-
 jeluvyöhykkeen läpi. Maantien liikennemäärä on noin 1900 ajon/vrk, josta raskaiden
 ajoneuvojen osuus on 13 %. Maantielle 31 on jo aikaisemmin toteutettu noin 500 m
 matkalle pohjavesien suojelutoimenpiteenä betoniset reunakivet, tiekaide, hulevesi-
 viemäröinti ja laskeutusallas. Esiselvityksessä kohteeseen ehdotettiin nopeuden toi-
 menpiteinä alentaminen (80 km/h), kaiteen ja reunakivien jatkaminen (1100 m),
 tieluiskien loiventaminen (tie 1015, 300 m) ja hulevesialtaan laajentaminen (500 m²).
 Lisäksi ehdotettiin nykyisen tiekaiteen vaihtamista H2-tyyppiseksi 1400 m matkalta
 (kaidetyyppi H2 kestää tavanomaista tiekaidetta paremmin raskaiden ajoneuvojen
 törmäykset), mutta kaide ei ollut mukana lopullisessa jatkosuunnitteluvaihtoehdossa.
 (Trafikverket, 2013)



Kuva 23. Esisuunnitelman mukaiset toimenpiteet 31-tiellä (Trafikverket, 2013)

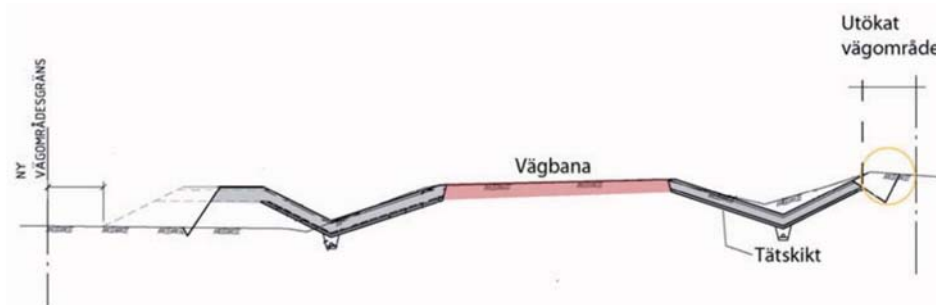
Suunnittelua jatkettiin ja tiesuunnitelmavaiheessa todettiin, että suunniteltuja toimenpiteitä ei ole mahdollista toteuttaa kustannusraamin puitteissa, mistä johtuen suunnitelmasta tehtiin päivitetty riskiarvio. Riskiarviossa todettiin, että pohjavesialueeseen kohdistuvat riskit ovat niin pieniä, että hanke ei ole esitettyssä laajuudessa kannattava. Hankkeelle tullaan toteuttamaan vuonna 2015 tehdyn selvityksen mukaan ainoastaan H2-tyyppisen (kaidetyyppi H2 kestää paremmin raskaiden ajoneuvojen törmäykset kuin tavanomainen tiekaide) tiekaiteen rakentaminen 2050 m matkalle molemmille puolille ajorataa sekä pohjavesialueelle tullaan laatimaan valmiussuunnitelma. (Trafikverket, 2015b)



Kuva 24. H2-tyyppisen kaide 31-tiellä (Trafikverket, 2015b)

Esimerkki suunnitelluista toimenpiteistä 363-maantiellä Umeåssa

Vägverket laati vuonna 2008 selvityksen Vendelälvarjun pohjavesialueen suojelemiseksi tieltä tulevalta hulevesiltä. Maantien liikennemäärä on noin 1700 ajon/vrk, josta raskaiden ajoneuvojen osuus on 8 %. Esiselvityksessä kohteeseen ehdotettiin toimenpiteinä tien poikkileikkauksen levittäminen, luiskien tiivistäminen geomembraanilla (käytetty HDPE kalvoa (HDPE: high density polyethylene)), kaiteellisen ja reunakivellisen osuuden jatkaminen, reunapalkin rakentaminen Tavelån kohdalla tien molemmille puolille sekä hulevesien kerääminen ja käsitteleminen. (Vägverket, 2008b)



Kuva 25. Tyypipoikkileikkaus luiskasuojausten kohdalta (Vägverket, 2008b)



Kuva 26. Pohjavesialueen merkintätapa (Kuva: Google Maps)

Vuonna 2008 suunniteltuja toimenpiteitä ei ole maantielle toteutettu. Vindelälvarjun pohjavesialueen suojauksesta tullaan päättämään parhaillaan suunnitteluvaiheessa olevan hankkeen ”maantien 363 parantaminen välillä Vindeln–Umeå” myötä. Hanke toteutettaneen 10 vuoden kuluessa. Hankkeesta on laadittu vuonna 2014 toimenpidesuunnitelma, jossa on esitetty mahdollisina toimenpiteinä pohjavedensuojelualueen merkitseminen, liikenneturvallisuuden parantamistoimenpiteet (tiekaiteiden rakentaminen ja niiden standardin nostaminen, heräteraidat), luiskasuojausten rakentaminen, suojavallin rakentaminen sekä helevesialtaiden rakentaminen.



Kuva 27. Kaaviokuva suojavallista sekä tiekaiteesta ja reunakivestä

4 Bentoniitti pohjavedensuojusrakenteessa

4.1 Yleistä bentoniitin ominaisuuksista

Bentoniittimatto koostuu kahdesta toisiinsa pysyvästi sidotusta geotekstiilistä, joiden välissä on luonnon bentoniittia. Bentoniittimatto asennetaan rakenteeseen kuivana, suojataan ohutmuovilla (eli geomembraanilla) ja peitetään maakerroksilla (rakentamisen aikaisen vaurioitumisen estämiseksi vähintään 300 mm paksuudelta) nopeasti levittämisen jälkeen. Bentoniittimatto hydratoituu vasta tiivistysrakenteessa. Parhaat vedenläpäisevyysominaisuudet saavutetaan, jos tiivistysrakenteen peitesyvyys hydratoitumisen aikana on vähintään 500 mm (bentoniitin jännitystila hydratoitumisen aikana vaikuttaa bentoniitin vedenläpäisevyyteen huokosluvun kautta siten että korkeampi jännitystila johtaa alhaisempaan huokoslukuun ja vedenläpäisevyyteen). Bentoniittimatoissa neulasidonta estää bentoniittia paisumasta maksimaaliseen huokoisuutensa ja parantaa bentoniittimattojen tehokkuutta. Hydratoituminen kestää tavallisesti viikosta kolmeen viikkoon. Pohjavedensuojusrakenteen optimaalinen tiiveys ja tiiviinä säilyminen edellyttää myös, että geomembraanin ja bentoniittimaton välinen tartunta on hyvä, rakennusaikana ei sada ja bentoniitti pystyy absorboimaan riittävästi kosteutta ympäröivistä maakerroksista. (Hämäläinen et.al., 2005)

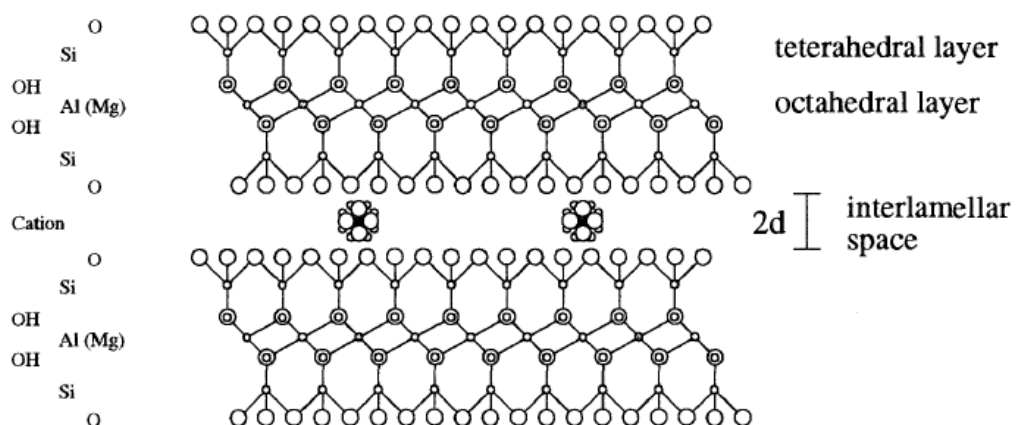
Bentoniitti on paisuvahilainen, pehmeä ja helposti muovautuva savi, joka on syntynyt vulkaanisen tuhkan rapautumisen seurauksena. Suomeen bentoniittia on tuotu aiemmin lähinnä Yhdysvalloista tai Euroopan eteläosista (Kreikka, Italia, Espanja, Kypros). Bentoniitin tuottajia ovat edellä mainittujen lisäksi ainakin Kiina, Turkki, Intia, Meksiko, Brasilia, Japani, Puola, Unkari, Argentiina ja Kanada. Tuotannossa raakabentoniitti louhitaan, kuivataan ja sen jälkeen prosessoidaan mm. murskaamalla ja jauhamalla.

Bentoniitin päämineraali on montmorilloniitti. Montmorilloniitin mineraloginen koostumus, montmorilloniittipitoisuus ja sen myötä bentoniitin ominaisuudet vaihtelevat alueellisesti ja myös valmistustapa vaikuttaa esimerkiksi materiaalin tasalaatuisuuteen. Maarakentamisessa hyödynnettävää bentoniittia on kolmea eri tyyppiä: kalsiumbentoniitti, natriumbentoniitti sekä natriumaktivoitu kalsiumbentoniitti. Suomessa maanteiden pohjavesisuojusrakenteissa käytetään ainoastaan luonnon natriumbentoniittia. Luonnon natriumbentoniitti on ominaisuuksiltaan luonnon kalsiumbentoniittia ja natriumaktivoitua kalsiumbentoniittia parempi. Natriumbentoniitin vedenläpäisevyys on kertaluokkaa pienempi kuin kalsiumbentoniitilla. Vastaavan vedenläpäisevyyden saavuttamiseksi kalsiumbentoniittirakenteessa täytyisi olla kaksinkertainen määrä bentoniittia kuin natriumbentoniittirakenteessa, mikä käytännössä hidastaisi ja vaikeuttaisi rakentamista. Natriumbentoniitilla on kyky sulkea pieniä esimerkiksi kuivumiskutistumisesta aiheutuneita halkeamia (self-healing-ilmiö).

Bentoniitin hyvä toimivuus vedeneristysrakenteissa perustuu montmorilloniitin hyvään kykyyn absorboida vettä. Suotuisissa olosuhteissa bentoniitti paisuu tilavuudeltaan jopa kymmenkertaiseksi kuivan bentoniitin tilavuuteen verrattuna. Hyvän tiiveyden ja alhaisen vedenläpäisevyyden saavuttamiseksi bentoniitin paisumisen tulee tapahtua riittävässä jännitystilassa – vähintään 500 mm paksuisen maakerroksen painon alla. Ellei bentoniitin tilavuuden muuttumista rajoiteta paisumisen yhteydes-

sä, tulee bentoniittikerroksesta löyhä eikä vedenläpäisevyys saavuta optimaalisia arvoja. Nykyisissä bentoniittimatoissa liiallisen tilavuuden kasvun riskiä pystytään hallitsemaan hyvin ala- ja yläpuolisen geotekstiilin neulaamisella. (Karnland 1998, Essington 2004)

Montmorilloniitin kemiallinen monikerrosrakenne on esitetty kuvassa 28. Rakenteessa alumiinioksidimolekyylikerroksen molemmilla puolilla on piioksidimolekyylikerrokset. Nämä kerrokset ovat sähkövaraukseltaan negatiivisia ja niiden välissä on löyhästi kiinnittyneitä ja helposti vaihtuvia kationeja vesimolekyylien ympäröiminä. Mitä enemmän montmorilloniitin monikerrosrakenteen kerrosten väliin sitoutuu pysyvästi vettä, sitä pienempi on materiaalin vedenläpäisevyys. Kationien vaihtumisreaktio on tasapainoreaktio. Kationin vaihtumisherkkyys riippuu hydratoituneen kationin säteestä, joka on moniarvoisilla kationeilla suurempi kuin yhden arvoisilla kationeilla. Hydratoituneen kationin säteen suurusjärjestys bentoniitissa yleisesti esiintyvillä kationeilla on seuraava: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$. Esimerkiksi suurella ylimäärällä natriumia voidaan kuitenkin muuttaa luonnon kalsiumbentoniitti natriumaktivoiduksi kalsiumbentoniitiksi. (Karnland 1998, Essington 2004)



Kuva 28. Montmorilloniittisaven kemiallinen rakenne (Karnland 1998, 9).

Luonnon natriumbentoniitin monikerrosrakenteessa kationit ovat pääasiassa Na^+ -ioneja ja kalsiumbentoniitin kationit ovat pääasiassa Ca^{2+} tai Mg^{2+} -ioneja. Natriumaktivoidussa kalsiumbentoniitissa alkuperäiset kationit on alkalisen aktivoinnin avulla korvattu Na^+ -ioneilla. Aktivointia vastaavaa ioninvaihtoreaktiota on käytännössä mahdotonta saada aikaiseksi muutoin kuin laboratorio- ja tehdasolosuhteissa, koska aktivointiin tarvitaan suuri Na^+ -ionien ylimäärä. Eri alueilta louhittujen bentoniittien kationien osuudet vaihtelevat melko paljon. Taulukossa 3 on esitetty esimerkiksi kationien osuuksien tutkimustuloksia Milokselta Kreikasta sekä Kutchista ja Wyomingista USA:sta louhituista bentoniiteista.

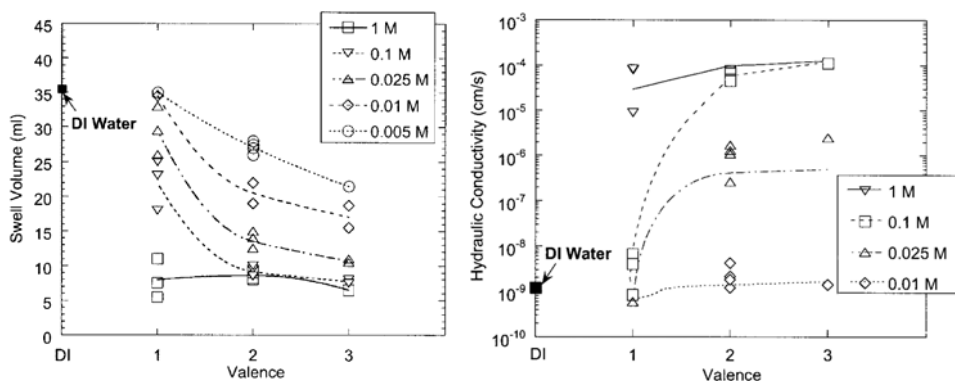
Taulukko 3. Eri tutkimuksissa analysoidujen bentoniittien kationien %-osuusia (Aineistot: Posiva, 2011 ja SKB, 2009)

Bentoniitti	Ca %	K %	Mg %	Na %
Milos 1 (Mg>Ca>Na)	40	3	48	9
Milos 2 (Ca>Na>Mg))	44	2	24	30
Milos 3 (Ca-bentoniitti)	43	2	32	24
Kutch 1 (Na>Ca>Mg)	31	0	14	55
Kutch 2 (Na>>Ca=Mg)	9	0	11	80
Wyoming (Na-bentoniitti)	26	2	9	62
Wyoming 2 (Na-bentoniitti)	27	2	9	62
Tyypillinen osuus natriumbentoniiteissa	5–25	alle 1	3–15	50–90

4.2 Kemikaalien vaikutus bentoniitin vedenläpäisevyyteen ja paisumisominaisuuksiin

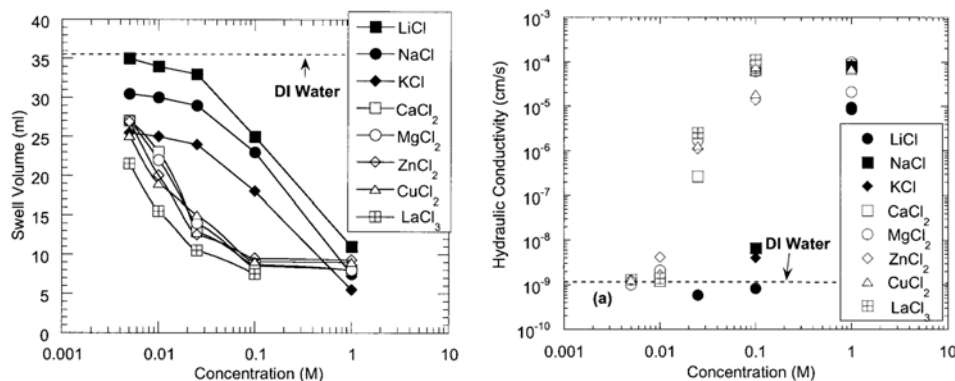
Kemikaalien vaikutusta bentoniitin paisumisominaisuuksiin ja vedenpidätyskykyyn on selvitetty useissa laboratoriotutkimuksissa ja niissä on osoitettu, että suolaliuosten aiheuttamat muutokset vedenpidätyskyvyssä riippuvat ensisijaisesti altistuksessa käytettävän suolaliuoksen konsentraatiosta ja suolaliuoksen kationien valenssista. Myös liuoksen happamuus vaikuttaa vedenläpäisevyysominaisuuksiin, jos pH on suurempi kuin 12 tai jos pH on pienempi kuin 3. Vaikutus johtuu bentoniitin savipartikkeleja ympäröivän vesifilmin ohentumisesta. (Jo et. al 2001)

Kationien valenssi vaikuttaa sekä natriumbentoniitin paisumisominaisuuksiin että vedenjohtavuuteen (kuva 29 a ja b). Mitä pienempi on kationien valenssi, sitä voimakkaampaa on bentoniitin paisuminen. Suurin tilavuuden muutos tapahtuu altistettaessa bentoniitti liuoksille, jotka sisältävät yhden arvoisia kationeita (eli pieni kationin valenssi), kuten K^+ , Na^+ ja Li^+ . Keskisuurta tilavuuden muutos on kahden arvoisilla kationeilla kuten Ca^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} ja Cu^{2+} ja pienintä kolmen arvoisilla kationeilla kuten La^{+3} . Bentoniitin vedenjohtavuuteen kationien valenssi vaikuttaa niin, että yhden arvoisilla kationeilla vedenjohtavuus on pienin ja kolmen arvoisilla kationeilla vedenjohtavuus on suurin. (Jo et. al 2001)



Kuva 29. Suolaliuoksen kationin valenssin vaikutus natriumbentoniitin paisumiseen (a) ja hydrauliseen johtavuuteen (b)

Kun bentoniitin altistuksessa käytettävän liuoksen konsentraatiota lisätään, poistuu montmorilloniitin kerrosrakenteen sisältä vesimolekyyliä, minkä seurauksena bentoniitin tilavuus pienenee. Suurinta tilavuuden pienenemisen liuoskonsentraation kasvaessa on yhden arvoisia kationeja sisältävillä liuksilla (kuva 30 a). Bentoniitin vedenläpäisevyyssominaisuuksiin liuoskonsentraatio vaikuttaa niin, että pienillä konsentraatioilla vedenjohtavuus on pienin ja suurilla konsentraatioilla vedenjohtavuus on suurin (kuva 30 b). (Jo et. al 2001)

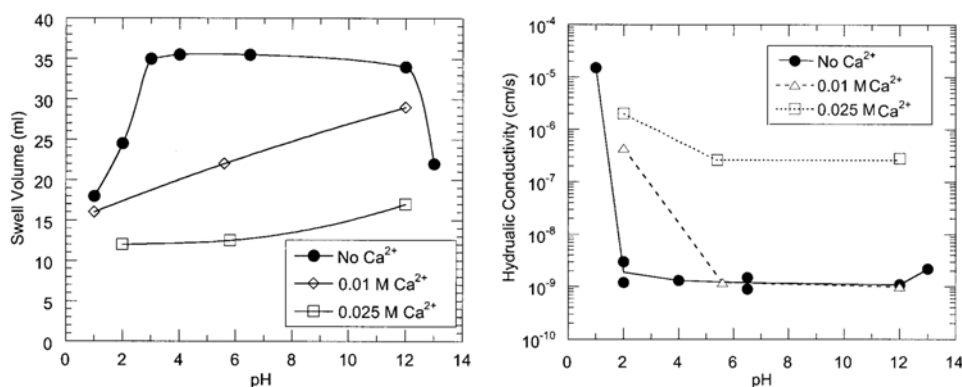


Kuva 30. Suolaliuoksen konsentraation vaikutus natriumbentoniitin paisumiseen (a) ja hydrauliseen johtavuuteen (b)

Taulukko 4. Natriumbentoniitin vedenjohtavuus eri liuksilla eri konsentraatioissa (Jo et. al 2001)

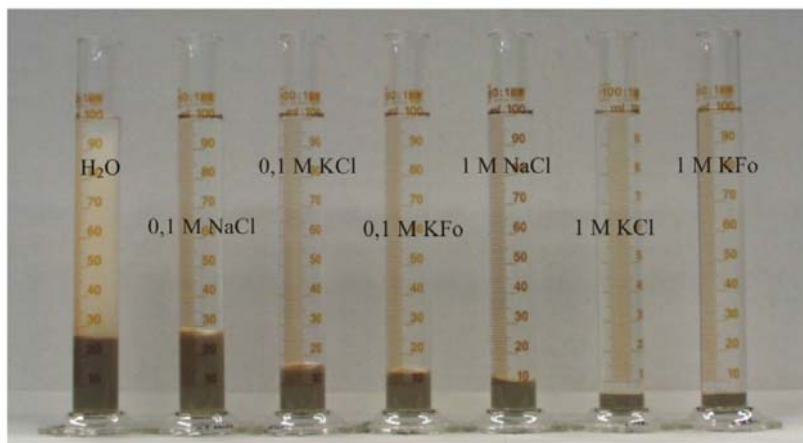
Vedenjohtavuus [(cm/s) M]						
Liuos	Kationi	1M	0,1 M	0,025 M	0,01 M	0,005M
NaCl	Na^+	$7,9 \times 10^{-5}$	$6,6 \times 10^{-9}$			
KCl	K^+	$8,3 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-9}$			
CaCl_2	Ca^{2+}	$8,7 \times 10^{-5}$	$6,3 \times 10^{-5}$	$2,6 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-9}$
MgCl_2	Mg^{2+}	$2,1 \times 10^{-5}$	$7,0 \times 10^{-5}$	$1,7 \times 10^{-6}$	$2,1 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-9}$
LaCl_3	La^{3+}	-	$1,1 \times 10^{-4}$	$2,5 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-7}$	
Vesi		$1,5 \times 10^{-9}$				

Altistavan liuoksen happamuus vaikuttaa bentoniitin paisumiseen ja bentoniitin vedenläpäisevyyteen siten, että vaikutus on nähtävissä hyvin happamissa (pH alle 3) ja hyvin emäksisissä liuksissa (pH yli 12) (kuvat 31 a ja b).



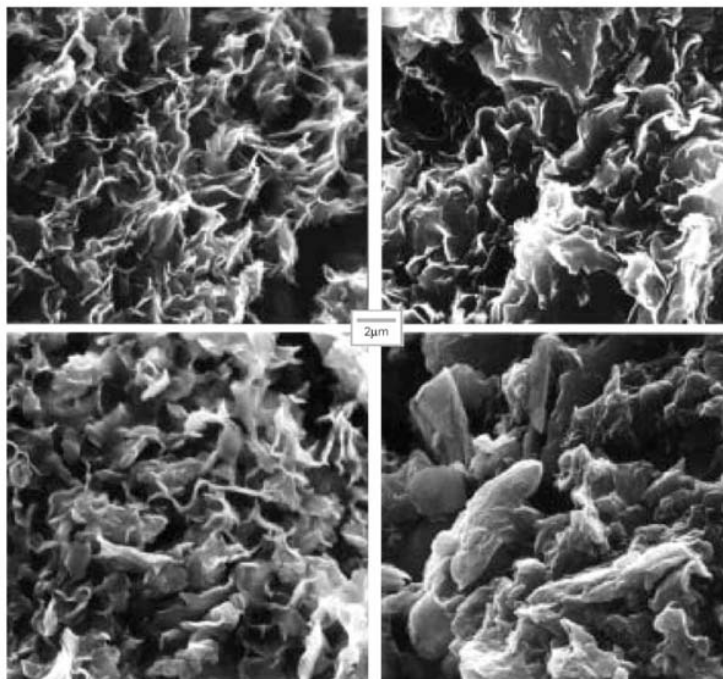
Kuva 31. Suolaliuoksen pH:n vaikutus natriumbentoniitin paisumiseen (a) ja hydrauliseen johtavuuteen (b)

Kaliumformiaatin vaikutuksia natriumbentoniitin BH200 ja natriumaktivoidun kalsiumbentoniitin AC200 paisumisominaisuuksiin tutkittiin Helsingin yliopiston pro gradu -tutkielmassa vuonna 2005. Tutkimuksessa todettiin, että tuloksista on selvästi nähtävissä paisumiskokeessa käytettyjen liuosten (vesi, natriumkloridi, kaliumkloridi ja kaliumformiaatti) vahvuuksien ja eri kationien vaikutus natriumbentoniitin BH200 ja natriumaktivoidun kalsiumbentoniitin AC200 paisumiseen. Kaliumionilla havaittiin olevan natriumioniin verrattuna suurempi negatiivinen vaikutus natriumbentoniitin BH200 ja natriumaktivoidun kalsiumbentoniitin AC200 paisumisominaisuuksiin. Kloridi-ionin ja formiaatti-ionin vaikutus paisumiseen todettiin olevan erittäin vähäinen. Tutkimuksen tulokset natriumbentoniitin osalta on esitetty kuvassa 32. (Kerko, 2005)



Kuva 32. Veden ja kahden eri vahvuisen liuoksen (natriumkloridi, kalsiumkloridi ja kaliumformiaatti) vaikutus natriumbentoniitin paisumiseen. (Kerko, 2005)

Koska bentoniitissa tapahtuva ioninvaihtoreaktio on tasapainoreaktio, se tapahtuu rakenteessa väistämättä joidenkin vuosien aikana. Ioninvaihto estyisi ainoastaan silloin, kun suotovesissä olisi luonnollisesti korkea natriumpitoisuus. Kuivumiskastumissyklit lisäävät natriumbentoniitin ioninvaihtoreaktion nopeutta, koska veden haihtuessa rakenteesta kasvaa huokosveden konsentraatio. Luonnon natriumbentoniitti on kuitenkin ioninvaihdon jälkeenkin parempia ominaisuuksia saavuttava tiivistyskerros kuin luonnon kalsiumbentoniitti tai natriumaktivoitu kalsiumbentoniitti eikä vedenläpäisevyysominaisuuksien heikkenemisestä ole tutkimusten mukaan vakavaa haittaa bentoniittimaton sellaisissa rakenteissa kuin maanteiden luiskasuojaus, sillä edellytyksellä, että bentoniittimatto ei pääse rakenteesta kuivumaan. Kuivuminen saattaa aiheuttaa bentoniitissa epäedullista mikrorakenteen muuttumista. Kuvassa 33 on esitetty elektromikroskooppikuvien vertailu luonnon natriumbentoniitista (vasen yläkuva), laboratorioaltistetusta (0,3 M CaCl_2 -liuos) luonnon natriumbentoniitista (vasen alakuva), koerakenteesta altistetusta (kaatopaikkarakenne 26 kk) luonnon natriumbentoniitista (oikea yläkuva) sekä luonnon kalsiumbentoniitista (oikea alakuva). Natriumbentoniitin mehiläiskennomainen mikrorakenne ja pieni raekoko ovat tutkituissa materiaaleissa säilyneet myös ioninvaihtoreaktion jälkeen. Mehiläiskennomainen mikrorakenne ja pieni raekoko edesauttavat hyvien vedenläpäisevyysominaisuuksien saavuttamista ja rakenteen kykyä korjata itse pieniä halkeamia ja vaurioita. Hyvien ominaisuuksien säilyminen ioninvaihtoreaktion jälkeen edellyttää, että bentoniitti ei pääse rakenteesta kuivumaan. (Egloffstein 2001)

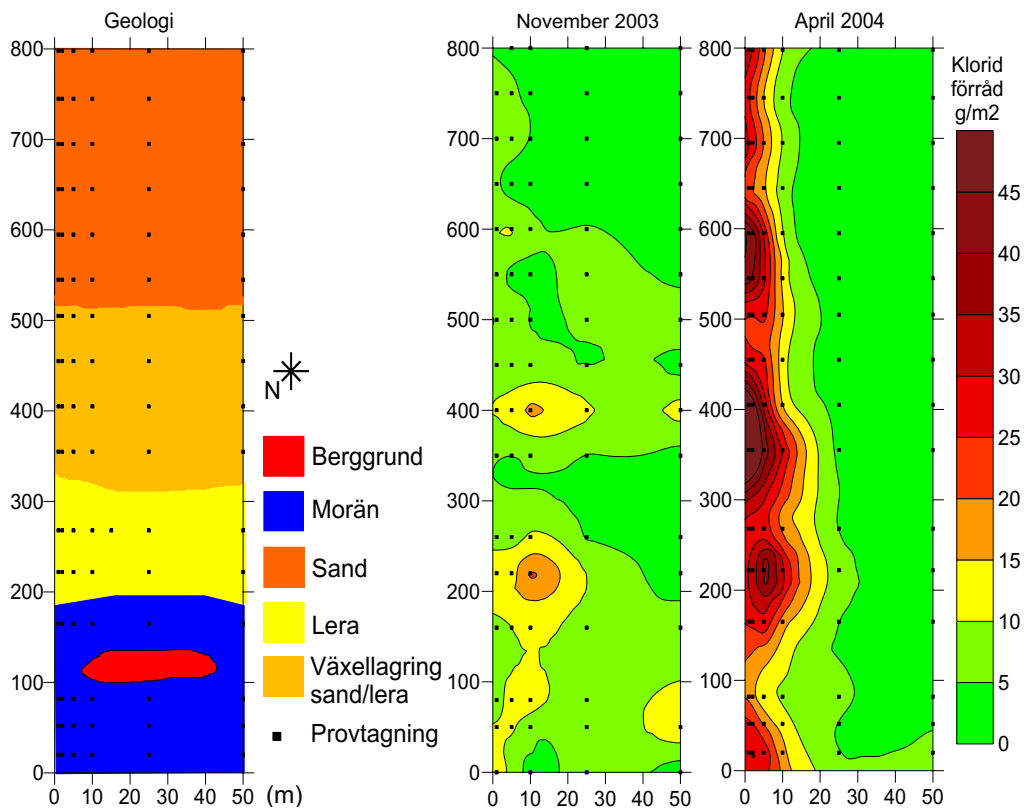


Kuva 33. Elektromikroskooppikuvien vertailu luonnon natriumbentoniitista (vasen yläkuva), laboratorioaltistetusta (0,3 M CaCl_2 -liuos) luonnon natriumbentoniitista (vasen alakuva), koerakenteessa altistetusta (kaatopaikkarakenne 26 kk) luonnon natriumbentoniitista (oikea yläkuva) sekä luonnon kalsiumbentoniitista (oikea alakuva). (Egloffstein 2001)

4.3 Hulevesien ja vajovesien vaikutus bentoniittiin

Suolan leviäminen tieltä ympäristöön

Suola leviää tieltä ympäristöön auratun lumen, sulamis- ja hulevesien sekä sumun mukana. Ruotsissa tiesuolan leviämistä ympäristöön on mallinnettu mm. maastotutkimuksiin perustuen. Selvityksessä maaperässä havaitut kloridipitoisuudet nousivat talvikauden aikana tien lähialueilla niin, että kloridipitoisuus huhtikuussa lähellä tietä 150–600 mg/l (vastaa noin 80–300 $\mu\text{g/g}$) ja kauempana tiestä (50 m etäisyydellä) 40–90 mg/l (vastaa noin 20–50 $\mu\text{g/g}$). Maaperän luonnollinen kloridipitoisuus Ruotsissa on 2–15 mg/l (vastaa noin 1–8 $\mu\text{g/g}$). Pitoisuuksien nouseminen rajoittui tutkimusalueella pääosin 10 m päähän tien reunasta. (Lundmark 2008)



Kuva 34. Tutkimusalueen geologinen kartta ja kloridipitoisuus (g/m²) pinta-kerroksessa (20 cm kerrospaksuus) marraskuun näytteenotossa ja huhtikuun näytteenotossa (berggrund = kallio, morän = moreeni, sand = hiekka, lera = savi, växellagring sand/lera = vaihtelevia kerroksia hiekkaa ja savea, provtagning = näytteenotto). (Lundmark 2008)

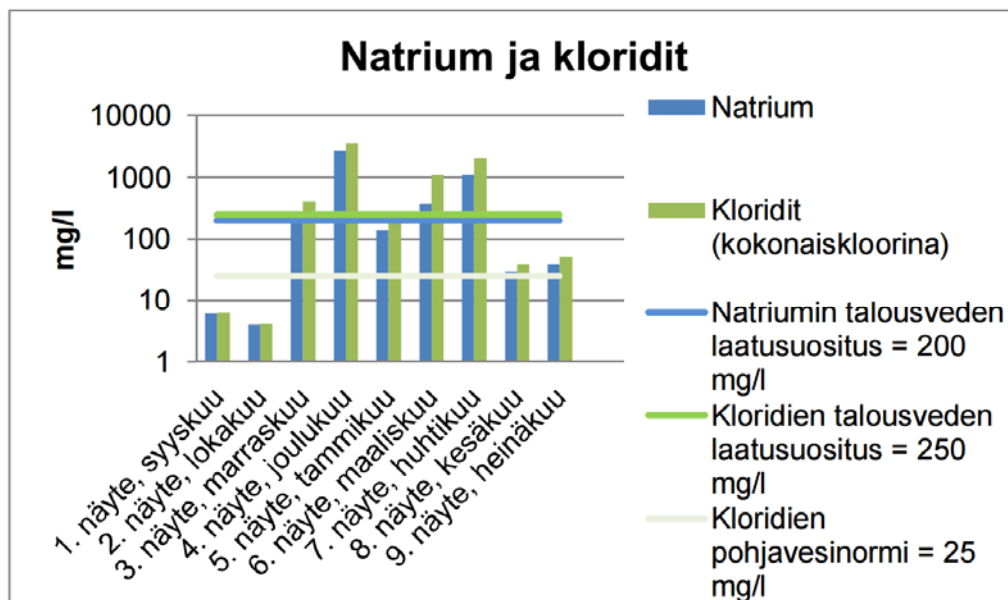
Kauriansalmen pohjavesialueella tutkittiin kaliumin leviämistä tien ympäristöön MIDAS-tutkimuksen yhteydessä. Tehtyjen analyysien mukaan suurimmat vaihtuvien kationien pitoisuudet löytyivät pääsääntöisesti tien läheisyydestä läheltä maan pintaa otetuista näytteistä ja pienimmät pitoisuudet etäämmällä tiestä ja syvemmältä maan pinnasta. (Kerko, 2005)

Hulevesien pitoisuudet

Liikennevirasto selvitti maanteiden hulevesien pitoisuuksia vuosien 2011–2012 aikana. Näytteitä otettiin vuonna 2011 syys-, loka-, marras- ja joulukuussa sekä vuonna 2012 tammi-, maalisk-, huhti-, kesä- ja heinäkuussa. Näytteet otettiin tieltä sateen aikana valuvista hulevesistä. Kloridin ja natriumin pitoisuudet olivat tutkituissa hulevesissä korkeimmillaan Is talvihoitoluokan teillä (taulukko 5 ja kuva 35). Tulosten perusteella voidaan arvioida, että maanteiden pohjavesisuojausissa bentoniittimatto voisi pahimmassa mahdollisessa tilanteessa altistua suolaliuokselle, jossa natrium- ja kloridipitoisuudet olisivat korkeimmillaan 0,1 M. Tilanne olisi mahdollinen korkeimman hoitoluokan teillä (Is), mutta se esiintyisi todennäköisesti hyvin lyhytaikaisesti. Selvityksen mukaan pitoisuudet laimenevat nopeasti sateen alun jälkeen (sähkönjohtavuus sateen alussa on 2300 mS/m, 30 min sateen alusta 1700 mS/m ja 60 min sateen alusta 1100 mS/m). (Liikennevirasto 2013)

Taulukko 5. Maanteiden hulevesien laatututkimusten tulokset (Liikennevirasto 2013), kloridipitoisuudet esitetty lisäksi mooleina. Pitoisuuksien vaihtelu (minimi-maksimi) näytteenottopisteittäin.

	Kehä I	Vt3, Tampere	Kt 65, Ylöjärvi	Kangas- alantie	Aito- niementie
KVL (ajon/vrk)	80 000	40 000	20 000	10 000	100
Talvihoito- luokka	Is 2-ajorat.	Is 2-ajorat.	Is 2-ajorat.	Ib	III
Sähkönjohta- vuus (mS/m)	7,0–990	5,2–360	4,5–150	2,6–97	2,5–9,0
Kloridit (mg/l)	4,1–3600	3,0–1200	3,0–410	1,2–280	1–15
Kloridit (M)	$1,2 \cdot 10^{-4}$...0,1	$8,5 \cdot 10^{-5}$...0,03	$8,5 \cdot 10^{-5}$...0,01	$3,4 \cdot 10^{-5}$...0,008	$2,8 \cdot 10^{-5}$...0,0004
Natrium (mg/l)	4,0–2700	1,5–340	2,6–380	1,1–49	0,9–11
Natrium (M)	$1,7 \cdot 10^{-4}$...0,1	$6,6 \cdot 10^{-5}$...0,02	$1,0 \cdot 10^{-4}$...0,02	$4,8 \cdot 10^{-5}$...0,02	$3,9 \cdot 10^{-5}$...0,005



Kuva 35. Maanteiden hulevesien laatututkimusten tulokset. Näytteenoton tulokset ja laatuvaatimukset, -suositukset ja normit: Kehä I (Liikennevirasto 2013)

Tulosten pohjalta ei voida suoraan päätellä vastaavan hoitoluokan kaliumformiaatti-kohteen ainepitoisuuksia, koska liukkaudentorjunnassa natriumkloridi levitetään joko kostutettuna rakeisena suolana tai 23-paino-% liuoksena ja kaliumformiaatti levitetään 50-paino-% liuoksena. Kaliumin vaikutusta natriumbentoniitin vedenläpäisevyyteen on selvitetty laboratoriotutkimuksissa kaliumkloridiliuoksella. Kaliumkloridin vaikutukset natriumbentoniitin vedenläpäisevyyteen ovat tutkimuksen mukaan samaa luokkaa kuin natriumkloridiliuoksen (taulukko 3). (Jo et. al 2001)

Uudenmaan ELY-keskus on selvittänyt Vt1 pohjavesialueella juurakkopuhdistamolle tulevien ja sieltä lähtevien vesien haitta-aineiden pitoisuuksia. Huleveden laatu on analysoitu sekä juurakkopuhdistamolle tulevasta vedestä että juurakkopuhdistamolta lähtevästä vedestä vuosina 2009 ja 2014 neljä kertaa vuodessa. Analysoitujen pitoisuuksien vaihtelut on esitetty seuraavassa taulukossa:

Taulukko 6. Vt1 pohjavesialueella juurakkopuhdistamolle tulevien ja sieltä lähtevien vesien haitta-aineiden pitoisuuksia

Ominaisuus	2009	2014
kloridi (Cl) tulevassa vedessä	29–130 mg/l	38–90 mg/l
kloridi (Cl) lähtevässä vedessä	26–130 mg/l	35–100 mg/l
kalium (K) tulevassa vedessä	1,7–3,1 mg/l	1,8–2,8 mg/l
kalium (K) tulevassa vedessä	1,9–2,9 mg/l	1,6–3 mg/l
kalsium (Ca) lähtevässä vedessä	13–23 mg/l	12–25 mg/l
kalsium (Ca) lähtevässä vedessä	17–24 mg/l	12–23 mg/l
natrium (Na) tulevassa vedessä	23–71 mg/l	33–64 mg/l
natrium (Na) lähtevässä vedessä	19–70 mg/l	31–75 mg/l

Hulevesitutkimuksessa (taulukko 5) havaitut pitoisuudet olivat kymmenkertaisia verrattuna juurakkopuhdistamolta analysoitujen vesinäytteiden pitoisuuksiin, joten voidaan hyvin olettaa, että 0,1 M pitoisuus edustaa lyhytaikaista maksimiarvoa hulevesien näissä selvityksissä analysoitujen haitta-aineiden pitoisuuksissa.

Suojaverhouskerroksen materiaaleista liukenevat aineet

Luiskasuojusrakenteessa bentoniittimatto altistuu tieltä tulevien haitta-aineiden lisäksi sadevesien mukana tuleville sekä suojaverhouksen maa-aineksista vajovesiin liukeneville kemikaaleille. Bentonitiin päällä oleva suojaverhous rakennetaan useista kerroksista, joiden materiaalina on kalliomursketta tai soraa ja moreenia. Suojaverhouksen pinnalle levitetään nurmen kasvualusta, jossa ei saa olla runsaasti kasviraivinteita.

Liikennevirasto on tutkinut pohjavesisuojausten suojaverhousmateriaaleja (rakeisuus ja haitta-aineiden pitoisuudet) tutkimuksessa, jossa haluttiin selvittää liikenteen ja kunnossapidon vaikutuksia tiealueen suojaverhousmateriaaleissa. Näytteitä otettiin tutkimuksessa tien sisäluiskasta ja ojan pohjalta eri syvyyksiltä (nurmetus, suojakerros, salaojaputkesta). Haitta-aineiden suurimmat pitoisuudet havaittiin pohjavedensuojusrakenteen pintakerroksessa – suurin havaittu natriumpitoisuus oli 899 µg/g ja suurin havaittu kloridipitoisuus oli 37 µg/g. Suojakerroksessa natriumpitoisuus oli enimmillään 298 µg/g. Kaikkien suojaverhousnäytteiden kloridipitoisuudet olivat alle määritysrajan <10 µg/g. Muut Liikenneviraston tutkimuksessa analysoidut aineet olivat raskasmetalleja eikä esimerkiksi kalsiumin, kaliumin ja magnesiumin pitoisuuksia määritetty.

Suojaverhouksen pinnalle levitettävän nurmen kasvualustan ravinteiden vaaditut tavoitearvot on esitetty InfraRYL:ssä ja ne ovat kalsiumilla 500 mg/l, kaliumilla 100 mg/l ja magnesiumilla 50 mg/l. Vaatimuservot ovat viljavuusanalyysin mukaisia arvoja ja ne vastaavat kalsiumilla viljavuusarvoa huono, kaliumilla osalta viljavuusarvoa välttävä tai tyydyttävä ja magnesiumilla osalta viljavuusarvoa huono. (InfraRYL 2016, Agroanalyysit, 2016)

Erialaisten kasvualustojen vaikutuksia vajoveden ja pohjaveden ravinnepitoisuuksiin on tutkittu SYKE:n toimesta soranottoalueiden jälkihoitoon liittyen. Yhdeksästä tutkitusta pintamateriaalista soranottoalueiden jälkihoitoon soveltuivat parhaiten maatuoneen turpeen ja hiekan seos sekä pintamaan ja hiekan seos, joiden vaikutukset vastasivat luonnontilaista maannosta jäljittelevän vertailurakenteen vaikutuksia. Tutkimuksessa vajoveden ainepitoisuudet olivat korkeimmillaan pian pintarakennemateriaalin levittämisen jälkeen (2–3 kk), minkä jälkeen ainepitoisuudet laskivat. Joidenkin aineiden (esimerkiksi kalsium) pitoisuudet nousivat kuitenkin koko tutkimusjakson ajan. Soranottoaikkojen jälkihoitotutkimuksessa korkein analysoitu vajovesien kalsiumpitoisuus oli 44 mg/l eli $1,1 \cdot 10^{-3}$ mol/l, magnesiumpitoisuus 7 mg/l eli $2,9 \cdot 10^{-4}$ mol/l, kaliumpitoisuus 6,4 mg/l eli $1,6 \cdot 10^{-4}$ mol/l, natriumpitoisuus 7,3 mg/l eli $3,1 \cdot 10^{-4}$ mol/l ja kloridipitoisuus 31,0 mg/l eli $8,7 \cdot 10^{-4}$ mol/l. (Rintala, 1997)

Taulukko 7. Vajoveden mediaaniarvot neljällä tutkitulla soranottoalueen pintarakenteella, suluissa eri ajankohtina tutkimusjaksolla tehtyjen veden laadun analyysien minimiarvot ja maksimiarvot, tutkimuksessa havaitut suurimmat arvot tutkimusrakenteissa L3, L4, L5, L8 tai L9 on lihavoitu. (Rintala, 1997)

Tutkimusrakenteen pintamaa	L3	L4	L5	L8	L9
Kalsium (mg/l)	32 (22–41)	27 (16–41)	26 (20– 44)	17 (7–34)	4 (3–5)
Kalium (mg/l)	4,5 (3,6–5,3)	4,1 (2,9– 6,4)	3,6 (2,4–5,5)	2,7 (1,9–4,9)	1,3 (1,0–2,4)
Magnesium (mg/l)	4,6 (2,6– 7,0)	3,9 (1,8–6,1)	2,5 (1,9–3,6)	2,8 (1,7–5,7)	1,4 (1,1–1,7)
Sähkönjohtavuus (mS/m)	23,0 (15,0– 33,4)	20,4 (11,4–23,1)	17,6 (14,4–22,8)	14,1 (6,2–28,0)	5,1 (4,6–7,3)
Kloridit (mg/l)	1,6 (0,4–3,5)	1,1 (0,4–1,7)	0,7 (0,2–1,7)	1,6 (0,3– 31,0)	0,9 (0,6–1,1)
Natrium (mg/l)	3,5 (2,1– 7,3)	2,7 (1,7–3,7)	1,8 (1,5–2,4)	2,2 (1,5–3,5)	1,6 (1,3–2,1)

L3: pintamaana maa-ainesten ottoalueelta kuoritun pintamaan ja soranpesuaseman pesulietteen yhdistelmä

L4: pintamaana soranpesuaseman pesulietteen ja kalkin yhdistelmä

L5: pintamaana soranpesuaseman pesulietteen, turpeen, hiekan ja kalkin yhdistelmä

L8: pintamaana maa-ainesten ottoalueelta kuoritun pintamaan ja ylijäämään yhdistelmä

L9: luonnontilainen vertailurakenne

Tutkimuksessa selvitettiin myös käytettyjen pintarakenteiden ainepitoisuudet. Pintarakennemateriaalien L3–L5 ja L8, vertailurakenteen L9 sekä tutkimusalueen pohjaan (Sr tai Hk) ainepitoisuudet joidenkin ionien osalta on esitetty alla taulukossa 8.

Taulukko 8. Lysimetrien pintarakenteen materiaalien ainepitoisuudet (tutkimusjaksoilla eri aikoina tehtyjen analyysien pienin ja suurin arvo) neljällä tutkittulla soranottoalueen pintarakenteella, pohjamaassa ja luonnontilaista vastaavassa vertailurakenteen pintamaassa

	L3	L4	L5	L8	Pohjamaa (Sr tai Hk)	Vertailurakenne
Natrium (µg/g)	1,3–6,2	2,0–10,4	1,1–4,3	1,7–9,3	0,4–8,3	0,6–0,7
Kalium (µg/g)	6,1–15,3	9,1–18,3	3,7–12,4	7,7–19,4	2,2–12,2	4,6–16,2
Kalsium (µg/g)	54,2–87,3	18,8–27,3	47,8–135	22–42,4	3,2–36,3	3,1–6,6
Magnesium (µg/g)	5–7	5–18	8–15	3–13	0,8–13,6	1–2
Kloridit (µg/g)	0,7–2,2	0,8–2,0	0,6–2,0	0,9–8,8	0,2–1,4	0,6–1,2

Hulevesien ja vajovesien haitta-aineiden vaikutus bentoniittiin

Maanteiden hulevesitutkimuksessa havaitut suurimmat natriumin ja kloridin pitoisuudet olivat noin 0,1 mol/l. Pitoisuudet laimenevat tutkimuksen mukaan nopeasti sateen alun jälkeen. Uudenmaan ELYn Vt1:n seurantoihin liittyvissä tutkimuksissa juurakkopuhdistamolle tulevien vesien ja juurakkopuhdistamolta lähtevien vesien ainepitoisuudet ovat olleet huomattavasti hulevesitutkimuksessa mitattuja arvoja pienempiä. Myös soranottoaikkojen pintarakenteita koskevassa tutkimuksessa havaittiin maanteiden hulevesiin nähden hyvin pieniä ainepitoisuuksia.

Laboratoriotutkimuksissa tehdyissä altistuksissa (Jo et. al 2001) on havaittu natriumbentoniitin vedenläpäisevyyden kasvua 0,1 mol/l natriumkloridiliuoksessa, mutta vedenläpäisevyys on ollut edelleen samaa kertaluokkaa kuin puhtaalle vedelle altistettaessa.

Voidaan arvioida, että bentoniitille haitallisia aineita sisältävien vesien vaikutus kohdistuisi yhdistelmä rakenteena toteutetuissa kloridisuojauksissa hyvin rajatulle alueelle eli kohtiin, joissa geomembraani on reikiintynyt. Vaikutus ei kohdistuisi koko suojauksen alalle. Bentoniittimaton vedenläpäisevyys ei todennäköisesti kasvaisi maanteiden hulevesien maksimipitoisuuksissa merkittävästi.

4.4 Bentoniitin ioninvaihdon vaikutukset pohjavedensuojausten toimivuuteen

Laboratoriotutkimuksissa havaittu natriumbentoniitin vedenläpäisevyyden kasvu suolaliuokselle altistettaessa voi tapahtua myös pohjavedensuojauksrakenteissa, kun natriumbentoniitti altistuu paikallisesti maanteiden hulevesien haitallisille aineille. Bentoniitin täydellinen hydratoituminen rakenteessa asentamisen jälkeen voi kestää 1–3 viikkoa. Toimiakseen tehokkaasti luiskasuojauksissa bentoniitin tulee saavuttaa vähintään 100%:n vesipitoisuus. Täysin hydratoituneen bentoniitin vesipitoisuus luiskasuojauksista vastaavassa jännitystilassa on 250%. Hydratoitumisvaihe voi olla kriittinen tekijä maton toimivuuden kannalta, mikäli bentoniitin toiminnalle haitallisten kemikaalien aiheuttama kuormitus kohdistuu mattoon joko nopeasti asentamisen jälkeen tai mikäli matto pääsee kuivumaan käytön aikana.

Maanteillä käytetyissä pohjavesisuojausrakenteissa rakenteiden haitallinen kuivuminen on pyritty estämään yhdistelmärakenteella, jossa mineraalisen tiivistyskerroksen päälle asennetaan geomembraani ja tiivistyskerrokset suojataan suojaverhouskerroksella. Bentoniittimatto ei maanteiden pohjavesisuojausten yhdistelmärakenteissa pääse käytännössä Suomen ilmasto-olosuhteissa kuivumaan, mikäli se on rakenteessa kerran kostunut. Toimivuuden kannalta on kuitenkin tärkeää, että bentoniittisavi saa kidehilaansa puhdasta vettä ja pääsee paisumaan ennen kuin suolapitoiset suotovedet pääsevät vaikuttamaan rakenteeseen. (VTT 1999)

5 Johtopäätökset ja jatkotutkimusehdotukset

Johtopäätökset

Toimivien bentoniitista rakennettujen pohjavesisuojausten kohdalla ei suositella kaliumformiaatin käyttöä liukkaudentorjunnassa, sillä kaliumformiaatti voi teoriassa heikentää bentoniitin paisumiskykyä ja johtaa tiivistysrakenteen vedenläpäisevyyden kasvuun. Myös kalsiumkloridi ja suojausrakennetta peittävästä maa-aineksista suotovesiin liukenevat ravinteet kuten kalsium ja magnesium voivat periaatteessa vaikuttaa bentoniitin vedenpidätysominaisuuksiin kuten kaliumformiaatti. Tyypillisistä vaatimusten mukaisista suojausrakenteen maa-aineksista suotovesiin liukenevien ravinteiden määrät ovat kuitenkin todennäköisesti huomattavasti vähäisempiä kuin maanteiden hulevesien haitta-aineiden määrät.

Maanteiden hulevesien liukkaudentorjunta-aineiden pitoisuudet ovat suurimmillaan korkeimman hoitoluokan teillä heti sateen alussa, jolloin natriumin ja kloridin pitoisuus on suurimmillaan noin 0,1 M. Pitoisuudet kuitenkin laimenevat mittausten mukaan nopeasti sateen alkamisen jälkeen. Hulevesitutkimuksessa havaitut pitoisuudet olivat kymmenkertaisia verrattuna esimerkiksi Uudenmaan ELYn Vt1:n seurannoissa juurakkopuhdistamolta analysoitujen vesinäytteiden pitoisuuksiin, joten voidaan hyvin olettaa, että 0,1 M pitoisuus edustaa lyhytaikaista maksimiarvoa hulevesien pitoisuuksissa.

Natriumbentoniitilla tehtyjen laboratoriotutkimusten mukaan 0,1 M pitoisuudessa natriumkloridiliuos (NaCl) lisää bentoniitin vedenläpäisevyyttä, mutta vedenläpäisevyys on altistuksen jälkeen edelleen samaa kertaluokkaa kuin ilman suolaliuoksen vaikutusta (tutkimuksessa saavutetut arvot olivat luokkaa $1 \cdot 10^{-9}$ cm/s). Kaliumkloridin (KCl) vaikutus natriumbentoniitin vedenläpäisevyyteen on samaa luokkaa kuin natriumkloridin vaikutus. Kahdenarvoisia kationeja sisältävien kalsium- (CaCl_2) ja magnesiumkloridien (MgCl_2) vaikutukset ovat suurempia - vedenläpäisevyyсарvot kasvavat 0,1 M pitoisuuksissa tasolle $1 \cdot 10^{-5}$ cm/s. Kaliumformiaatin (HCOOK) vaikutusta natriumbentoniitin ominaisuuksiin tutkittiin suomalaisessa pro gradu -tutkielmassa, jossa selvitettiin bentoniitin paisumisominaisuuksia erilaisissa nesteissä altistettuna. Tutkimuksen mukaan kaliumformiaatin vaikutukset natriumbentoniitin paisumiseen ovat samaa luokkaa kuin kaliumkloridin vaikutukset. Suomalaisessa tutkimuksessa ei selvitetty bentoniitin vedenläpäisevyyden muuttumista altistuksessa.

Maanteiden hulevesien natriumkloridipitoisuuksien perusteella ei voida suoraan päätellä vastaavaa kaliumformiaatin pitoisuutta hulevesissä, sillä liukkaudentorjunnassa kaliumformiaatti levitetään 50 p-% liuoksena ja natriumkloridi joko rakeisessa muodossa tai 23 p-% liuoksena.

Maanteiden hulevesiä analysoineen tutkimuksen näytteet otettiin hulevesikaivoista, siltojen tippuputkista ja johtamalla hulevettä tien pientareelta kourulla näytteenottosäiliöön. Näytteissä ei näin ollen ole mukana vesi- ja haitta-ainemäärät, jotka ovat siirtyneet esimerkiksi lumen aurauksen seurauksena pois tieltä.

On mahdollista, että natriumbentoniitin ioninvaihtoreaktio tapahtuu maanteiden pohjavesisuojuuksissa. Erityisen haitalliset vaikutukset ioninvaihdolla on, mikäli bentoniitti on rakenteessa kuiva joko siksi, että se ei ole ennättänyt hydratoitua riittävästi tai siksi, että se on päässyt kuivumaan. Kloridisuojausrakenteissa bentoniittimaton päällä oleva geomembraani ja suojaverhouskerros suojaavat bentoniittia kuivumiselta. Geomembraania ei kuitenkaan ole nykyisin ulotettu pohjavedensuojausrakenteen ulkoluiskassa bentoniittimaton reunaan saakka. Suomalaisissa materiaalitutkimuksissa on todettu, että bentoniittimatot eivät Suomessa kerran kastuttuaan enää täysin kuivu. Bentoniitin alhaisen vedenläpäisevyyden saavuttamiseksi on kuitenkin tärkeää, että bentoniitti hydratoituu puhtaassa vedessä ja paisuu riittävässä kuormitus-paineessa ennen kuin se joutuu kosketuksiin suolapitoisten suotovesien kanssa.

Kaliumformiaatin ja muiden liukkaudentorjunta-aineiden vaikutukset pohjavedensuojausrakenteiden bentoniittikerroksiin kohdistuvat kloridisuojausten yhdistelmä-rakenteissa sellaisiin kohtiin, jossa mineraalista tiivistyskerrosta suojaava geomembraani ei ole ehjä ja esimerkiksi ulkoluiskaan bentoniittimattoon, koska ulkoluiskaan bentoniittimatto on nykyisten ohjeiden mukaisesti asennettu ilman kalvoa. Tien sisäluiskassa ja pientarella geomembraaniin tulleiden reikien ja tehtyjen läpivientien kautta tiivistyskerroksen läpi suotautuvat vesimäärät ovat todennäköisesti pieniä, koska jatkuvaa veden painetta ei ole. Suurin vedenpaine ja suurimmat vuotoriskit kohdistuvat pohjavesisuojausrakenteessa ojan pohjalla tiivistysrakenteen alimpaan kohtaan. On esitetty asiantuntija-arviona, että pohjavedensuojausrakenteen ulkoluiskassa ilman geomembraania oleva bentoniittimatto saattaa olla kuiva, mikä olisi rakenteen toimivuuden kannalta riski.

Onnettomuussuojaukset pohjavesialueella rakennetaan ilman geomembraania. Suojauksen luokaksi voidaan valita onnettomuussuojaus sellaisilla teillä, joissa käytetään suolaa selvästi vähemmän kuin 8 t/km/v. Suojauksen toimivuusvaatimuksena niissäkin tapauksissa on, että se pidättää säiliöauto-onnettomuuden tapauksessa vaarallisia aineita 12 tunnin ajan. Tiivistyskerros tulee aina mitoittaa rakenteeseen toimivuusvaatimusta korkeammalle tasolle. Onnettomuussuojauksiin ei rakenneta kuivatusrakenteita, jotka johtaisivat haitta-ainepitoisia vesiä pois suojauksen päältä. Voidaan arvioida, että onnettomuussuojausrakenteissa ioninvaihtoreaktion ja siitä johtuvan vedenläpäisevyyden heikkenemisen mahdollisuus on suurempi kuin kloridisuojausrakenteissa, koska geomembraani ei suojaa bentoniittimattoa haitta-ainepitoisilta vesiltä ja kuivumiselta ja kuivatusrakenteet eivät vie haitta-ainepitoisia vesiä nopeasti pois tiivistyskerroksen päältä, joten maanteiden normaalien hulevesien sisältämät haitta-aineet saattavat päästä vaikuttamaan tiivistyskerrokseen pitkäaikaisesti ja laaja-alaisesti. Toisaalta rakenteen säilyminen kosteampana tiivistysrakenteen pohjalla, kun kuivatusrakenteita ei ole, on todennäköisesti myös rakenteen toimivuuden säilymistä edistävä tekijä.

Tutkimustietoa Suomessa toteutettujen maanteiden pohjavesisuojausten tiivistyskerroksiin asennettujen bentoniittimattojen ominaisuuksista (mm. vesipitoisuus, vedenläpäisevyys, kemiallinen koostumus) tarvitaan lisää, jotta voidaan tehdä päätelmiä kaliumformiaatin vaikutuksista bentoniittisen tiivistysrakenteen toimivuuteen.

Jatkotutkimus- ja jatkotoimenpide-ehdotukset

Jatkotutkimuksina ja jatkotoimenpiteinä ehdotetaan seuraavaa:

1. Tarkistetaan pohjavesisuojausten kuvauksista ja hoidon ja ylläpidon ohjeistuksesta sekä tarvittaessa myös muista asiakirjoista onko nykyinen pohjavesisuojausten hoidon ohjeistus riittävä pohjavesisuojausten hyvän toimivuuden säilyttämiseksi. Selvitetään hoidon käytäntöjä esimerkiksi ELY-keskusten edustajia (kunnossapito ja ympäristö) haastatteleamalla, esimerkiksi seuraavat kysymykset:
 - Onko pohjavesisuojausten kuvaukset laadittu kattavasti koko ELY-keskuksen alueelta ja onko niissä mukana lopullista rakennetta vastaavat toteutumakuvat?
 - Onko hoidon ohjeistuksessa kielletty kalsiumkloridin käyttö pohjavesisuojausten kohdalla?
 - Onko niitto ja vesakonraivaus ohjeistettu pohjavesisuojausten edellyttämällä tavalla? Onko suojauksen päällä liikkumista raskaalla kalustolla rajoitettu?
 - Millä tavoin lumen auraus ja lumen ja sohjon poisto hoidetaan pohjavesisuojausten kohdalla? Onko pohjavesisuojausten kohdalle asetettu rajoituksia sille, kuinka kauas luiskaan lumen saa heittää? Voidaanko aurauvalleihin kasaantunut lumi kuljettaa suojauksen kohdalta kokonaan pois pohjavesisuojausalueelta?
 - Onko pohjavesisuojausten kunnossapidossa havaittu käytännössä puutteita esimerkiksi rumpujen ja hulevesikaivojen puhdistamiseen tai vesakonraivauksen toteuttamiseen liittyen?
 - Onko pohjavesisuojausten kuntokartoituksia tehty? Mitä tietoja pohjavesisuojauksista selvitetään hoidon ja ylläpidon urakoiden inventoinneissa sekä varusteiden ja laitteiden inventointien yhteydessä? Ovatko nykyisin kerättävät tiedot riittäviä suojauksen kunnon ylläpitämiseksi?
2. Jatketään maanteiden hulevesien laadun tutkimuksia. Selvitetään lumen sulamisvesien kemiallinen koostumus. Selvitetään hulevesien kemiallista laatua valikoitujen pohjavesisuojausten purkukohdissa laajalla laadunseurannalla samaan tapaan kuin seurannat on tällä hetkellä toteutettu Uudenmaan ELY:ssä muutamilla erityisseurannassa olevilla pohjavesialueilla.
3. Selvitetään tarpeet geoteknisten tutkimusten ja mittausten tarkemmalle ohjeistamiselle pohjavesisuojauksia koskien jo yleissuunnitteluvaiheessa, jotta pohjavesialueiden osalta saadaan riittävät tiedot tarpeeksi aikaisessa vaiheessa suojauksen luokasta ja rajauksesta päättämistä varten. Tarkistetaan pohjavesisuojausten suunnittelua koskeva ohjeistus tutkimusten ja mittauksen sekä eri suunnitteluvaiheiden sisältöjen kuvausten osalta. Selvitetään lisäksi, onko tarpeen ohjeistaa uudelleen tai tarkentaa ohjeistusta geoteknisten mittausten ja tutkimusten osalta erityisesti tarveselvitysvaihetta, esisuunnitteluvaihetta ja yleissuunnitteluvaihetta koskien. Selvitetään myös, onko tarpeen tarkentaa tarveselvitysvaiheen, esisuunnitteluvaiheen ja yleissuunnitteluvaiheen yleisempää ohjeistusta pohjavesisuojausten suunnittelun osalta.

4. Selvitetään kaliumformiaatin vaikutusta natriumbentoniitin vedenläpäisevyyteen laboratoriokokein. Selvitetään paisumisindeksin lisäksi myös vaikutus vedenläpäisevyyssarvoon. Tehdään kokeita rinnakkain useilla suolaliuoksilla (NaCl , CaCl_2 , KCl , HCOOK , HCOONa ja mahdollisesti muita liuoksia) sekä vedessä. Tehdään kokeet useissa pitoisuuksissa (esimerkiksi 0,1 M, 0,025 M, 0,01 M).
5. Selvitetään maastotutkimuksin pohjavesisuojausten tiivistyskerrosten kuntoa joiltain koekohteilta. Tehdään tutkimuksia sekä kloridisuojausrakenteista että onnettomuussuojausrakenteista.
 - Hankitaan lähtötiedoiksi mm. kohteiden suunnitelmatiedot, pohjavesialueen kuvaus, pohjavesialueen merkintä, pohjavesisuojauksen hoidon ohjeistus, pohjavesialueella tapahtuneet liikenneonnettomuudet (suistumiset) sekä onko tienpitäjällä tiedossa muita pohjavesisuojauksen kuntoon mahdollisesti vaikuttaneita tekijöitä.
 - Otetaan materiaalinäytteitä muutamista poikkileikkauksista pohjavesisuojauksen ”yläjuoksulta” ja ”alajuoksulta”. Otetaan näytteet pientareen kohdalta, sisäluiskasta ja ulkoluiskasta.
 - Tutkitaan näytteenoton yhteydessä rakenteessa toteutuvat kerrospaksuudet. Tarkastetaan maastossa silmämääräisesti ja tarvittaessa mittauksin täydentämällä mm. suojaverhouksen kunto, eroosioauriot suojauksessa, kasvillisuuden kunto, ylisuuret rakeet suojaverhouksmateriaalissa, geomembraanin kunto (reikiintyminen, ryppyisyys, limitysten teko tapa ja kunto), geomembraanin ja bentoniittimaton välinen tartunta sekä bentoniittimaton kunto.
 - Tutkitaan bentoniittimatonnäytteistä ainakin neliöpaino, kosteuspitoisuus, vedenläpäisevyys sekä kemiallinen koostumus. Pyritään selvittämään sekä keskimääräiset arvot että bentoniittimaton tasalaatuisuutta näiden ominaisuuksien suhteen. Kemiallisen koostumuksen osalta kiinnostavaa on ainakin bentoniittimaton nykyinen vapaiden kationien (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} ja Mg^{2+}) koostumus ja myös se onko bentoniitissa tapahtunut ioninvaihtoa. Ioninvaihdon selvittämiseksi tarvittaisiin tiedot bentoniitin alkuperäisestä koostumuksesta.

Näytteenotto tiivistyskerroksesta on riski pohjavedensuojausrakenteen toimivuudelle. Tutkimuskohde ja näytteenottopaikka tulee valita niin, että minimoidaan mahdolliset haitat pohjavesien laadulle. Näytteenoton jälkeen kohta ja sen ympäristö tulee tiivistää erityistä huolellisuutta noudattaen esimerkiksi bentoniittipastalla. Tiivistystapa ja tiivistämisessä käytettävät materiaalit tulee suunnitella huolellisesti etukäteen.

Lähteet

Eduskunta, 2014. Hallituksen esitys Eduskunnalle laiksi vesienhoidon ja merenhoidon järjestämisestä annetun lain muuttamisesta. HE 101/2014 vp.

European Commission, 2015. Report on the progress in implementation of the Water Framework Directive Programmes of Measures.

EEA, 2016a. European Environment Agency. Freshwater quality. [www-sivu.](http://www.eea.europa.eu/soer-2015/europe/freshwater)
<http://www.eea.europa.eu/soer-2015/europe/freshwater> Sivulla käyty 16.6.2016.

EEA, 2016b. European Environment Agency. Proportion of classified groundwater bodies in different River Basin Districts in poor chemical status. Sivulla käyty 16.6.2016.

EEA, 2016c. Percentage of groundwater bodies in poor quantitative status by RBDs (counted to GWBs with known quantitative status). European Environment Agency Sivulla käyty 16.6.2016.

Euroopan komissio, 2008. Pohjaveden suojelu Euroopassa, Uusi pohjavesidirektiivi – vahvistamassa EU:n lainsäädännön puitteita. Euroopan komissio, Ympäristöpääosasto, Tiedotuskeskus BU9 – 0/11. ISBN 978-92-79-09828-4. 2008.

Euroopan komissio, 2012. Komission tiedonanto Euroopan parlamentille, neuvostolle, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle, Suunnitelma Euroopan vesivarojen turvaamiseksi. Euroopan komissio, 14.11.2012.

GTK, 2002. Geologian tutkimuskeskus, Tutkimusraportti — Geological Survey of Finland, Report of Investigation 155, 2002. Pertti Lahermo, Timo Tarvainen, Tarja Hatakka et al.

GTK, 2016a. Geologian tutkimuskeskus. [www-sivu.](http://www.gtk.fi/_system/print.html?from=/ajankohtaista/media/uutisarkisto/index.html&year=2015&newsType=PressReleases&number=665) Maaperävuosi: Maaperän suojelu on myös pohjaveden suojelua. Julkaistu: 19.11.2015. Sivulla käyty 30.5.2016.
http://www.gtk.fi/_system/print.html?from=/ajankohtaista/media/uutisarkisto/index.html&year=2015&newsType=PressReleases&number=665

GTK, 2016b. Geologian tutkimuskeskus. [www-sivu.](http://www.gtk.fi/_system/print.html?from=/_system/PressReleases/news_0315.html) Pohjaveden laatu parantunut Suomessa. Uutisarkisto 1999.
http://www.gtk.fi/_system/print.html?from=/_system/PressReleases/news_0315.html

Hatakka et.al., 2009. Suomen pohjavesiseurantojen näytteenoton ja analyysitulosten vertailu. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 17/2009. Tarja Hatakka, Mirjam Orvoma ja Juhani Gustafsson.

Hellstén et.al., 2002. Vaihtoehtoisten liukkaudentorjunta-aineiden kulkeutuminen pohjaveteen. Pasi Hellstén, Taina Nystén, Pauliina Kokkonen, Matti Valve, Timo Laaksonen, Taimi Määttä ja Ilkka Miettinen.

Holm, 2011. Geofysisk utvärdering av grundvattenskydd mellan väg 11 och Vombs vattenverk. Johanna Holm. Kandidatuppsats i Geologi vid Lunds Universitet, nr. 283.

Hämäläinen et.al., 2005. Natriumkloridin vaikutus mineraalisten luiskasuojauksen vedenläpäisevyyteen. Hämäläinen, Jyrki; Gustafsson, Juhani; Hellsten, Pasi; Nystén, Taina. Suomen ympäristö 775/2005.

Karnland, O. 1998. Bentonite swelling pressure in strong NaCl solutions. Correlation of model calculations to experimentally determined data. POSIVA 98-01.

Kerko, 2005. Kaliumformiaatin kaliumin maaperävaikutukset Kauriansalmen pohjavesialueella. Pro gradu -tutkielma, Helsingin yliopisto, Elina Kerko.

Keskinen & Niemi 2011. Savisekainneet, Kaavausaineet. Tampereen ammattopisto 16.11.2011. <http://www.valuatlas.net> - ValuAtlas & Tampereen ammattopisto.

Liikennevirasto 2010. Liikenneympäristön ja varusteiden kunnossapidon toimintalinjat. Liikenneviraston toimintalinjoja 2/2010. Liikennevirasto. Helsinki 2010. 978-952-255-547-2.

Liikennevirasto 2011. Liikennejärjestelmän nykytilakatsaus liikennepoliittisen selonteon tausta-aineistoksi. Liikennevirasto, Liikenne- ja viestintäministeriä, Tafi.

Liikennevirasto 2013. Maanteiden hulevesien laatu. Laura Inha, Riitta Kettunen, Kimmo Hell. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 12/2013.

Liikennevirasto 2014. Liikenneviraston ympäristötoimintalinja. Liikenneviraston toimintalinjoja 1/2014.

Liikennevirasto, 2015a. Liikenneviraston ympäristöohjelma 2015–2018. Liikenneviraston toimintalinjoja 3/2015.

Liikennevirasto, 2015b. Luiskasuojauksen vaikutuksista pohjaveden kloridipitoisuuden eräissä kohteissa, vuonna 2000 ja sen jälkeen rakennetut suojaukset. Erja Vallila. Tutkimuksia ja selvityksiä 13/2015.

Liikennevirasto, 2016. Kaliumformiaatin käytön ympäristö- ja liikenneturvallisuusvaikutukset. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 5/2016. Taina Mattila, Marja-Terttu Sikiö, Päivi Jylänki, Anne Ekholm.

Lundmark et.al., 2007. Vägsalt i avrinnande vägdagvatten – uppföljning av vattenskyddsåtgärd längs väg E4 Bergaåsen. Kungliga Tekniska Högskolan, Mark- och vattenteknik, Vägverket Region Sydöst, Annika Lundmark, Matti Envall, Agne Gunnarsson. http://rymd.lwr.kth.se/forskningsprojekt/predmodell_vagsalt/Rapport_VSO_070201.pdf

Lundmark, 2008. Modelling av vägsaltets påverkan på vattnet i marken i en vägnära miljö. Väitöskirja. Department of Land and Water Resources Engineering Royal Institute of Technology (KTH)

Petäjä-Ronkainen, 2016. Pohjavesien tila, riskit, suojelusuunnitelmat, luokitusmuutokset, tietojärjestelmien ym. kehitystarpeet, tiivistelmä. Anne Petäjä-Ronkainen, Etelä-Savon ELY-keskus. Alueellinen vesihuoltopäivä 17.3.2016.

Rintala, 1997. Soranottoalueiden jälkihoito – pintarakennemateriaalit suojaverhouksessa. Jari Rintala. Suomen ympäristö 54/1997.

Rintala, 2014. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 20/2014. Pohjaveden laadun muutokset soranottoalueilla 1985–2013, Jari Rintala

SGU, 2016. <http://apps.sgu.se/kartvisare/> Sivulla käyty 17.6.2016.

SKB, 2009. Characterisation of bentonites from Kutch, India and Milos, Greece – some candidate tunnel back-fill materials? Siv Olsson, Ola Karnland, Clay Technology AB. R-09-53.

Smellie, J. 2001. Wyoming bentonites. Technical Report. Svensk Kärnbränslehanterin AB. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. 2001.

SYKE, 2016a. Suomen Ympäristökeskus. Www-sivu ”Muistilista kaliumformiaatin käyttöön”, [http://www.syke.fi/fi-FI/Tutkimus_kehittaminen/Tutkimus_ja_kehittamishankkeet/Hankkeet/Vaihtoehtoisten_liukkaudentorjuntaaineiden_kulkeutuminen_pohjavedessa_MIDAS/Muistilista_kaliumformiaatin_kayttoon/Muistilista_kaliumformiaatin_kayttoon\(7380\)](http://www.syke.fi/fi-FI/Tutkimus_kehittaminen/Tutkimus_ja_kehittamishankkeet/Hankkeet/Vaihtoehtoisten_liukkaudentorjuntaaineiden_kulkeutuminen_pohjavedessa_MIDAS/Muistilista_kaliumformiaatin_kayttoon/Muistilista_kaliumformiaatin_kayttoon(7380)). Sivulla käyty 30.5.2016

SYKE, 2016b. Suomen Ympäristökeskus. Www-sivu ”Vaihtoehtoisten liukkaudentorjunta-aineiden kulkeutuminen pohjavedessä (MIDAS)”. http://www.syke.fi/hankkeet/midas#Keskeiset_johtopaatokset_ja_tulosten_sovellettavuus. Sivulla käyty 30.5.2016.

SYKE, 2016c. Suomen Ympäristökeskus. Www-sivu ”Tieriskirekisteri TSRR”. [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat_ja_tilastot/Tietojarjestelmat/Tieriskirekisteri_TSRR\(27468\)](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat_ja_tilastot/Tietojarjestelmat/Tieriskirekisteri_TSRR(27468)). Sivulla käyty 30.6.2016.

Tiehallinto 2004a. Pohjaveden suojaus tien kohdalla. Suunnitteluvaiheen ohjaus. Tiehallinto. Helsinki 2004. ISBN 951-803-384-6

Tiehallinto 2004b. Pohjaveden suojausrakenteet 4840. Tierakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset. Tiehallinto. Helsinki 2004.

Tiehallinto 2006. Kalsiumkloridin sivuvaikutukset. Tiehallinnon selvityksiä 38/2006.

Trafikverket, 2011. TRV Rådsdokument, Vägdragvatten, Råd och rekommendationer för val av miljöåtgärd.

Trafikverket, 2013a. Förstudie - Vattenskyddsåtgärder längs väg 31 för Tikaskruvs vattentäkt, Nybro kommun, Kalmar län.

Trafikverket, 2013b. Åtgärdsvalsanalys, Pendlingsstråket Vindeln–Umeå, väg 363, Umeå och Vindelns kommun, Västerbottens län, Slutrapport 2013-09-30.

Trafikverket, 2015. Vattenskyddsåtgärder längs väg 34 vid Staby, Åtgärdsvalsanalys.

Trafikverket 2016. <http://www.trafikverket.se/e4-ljungby>. E4 delen Lagan–Toftaholm–Typsektioner. Sivulla käyty 30.6.2016.

Vallila, E. 2015. Luiskasuojauksen vaikutuksista pohjaveden kloridipitoisuuteen eräissä kohteissa. Vuonna 2000 ja sen jälkeen rakennetut suojaukset. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 13/2015. Liikennevirasto. Helsinki 2015. ISBN 978-952-317-068-1

Vattenportalen, 2016. WWW-sivu. Sivulla käyty 17.6.2016.
http://www.vattenportalen.se/fov_sve_djup_sot_grundvatten.htm

VISS, 2016. <https://viss.lansstyrelsen.se> Wwv-sivu. Vindelälvsåsen, Umeåområdet. Sivulla käyty 23.6.2016.

VTI 1991. Effektivare halkbekämpning med mindre salt: MINSALT-projektets huvudrapport. Gudrun Öberg, Kent Gustafson, Lennart Axelson, Statens Väg- och Trafikinstitut, Sveriges Vägverket, Svenska Kommunförbundet.

VTT 1999. Tammirinne, M. et al. Mineraalisten pohjavesisuojausten pitkäaikaistoimivuus. VTT Yhdyskuntateknikka. VTT Tutkimusraportti 510. 1999.

VYH, 1992. Sadeveden pitoisuus- ja laskeuma-arvot Suomessa 1990. Olli Järvinen ja Timo Vänni. Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja, nro 378.

Vägverket, 2003. Vägdikenas funktion och utformning, Vägverket, Publikation 2003:103, <https://online4.ineko.se/trafikverket/Product/Detail/43639>

Vägverket 2008a. Arbetsplan, beskrivning, Väg 363 vattenskydd Vindelälvsåsen.

Vägverket 2008b. Miljökonsekvensbeskrivning Väg 363 Vattenskydd Vindelälvsåsen Umeå kommun, Västerbottens län.

Ympäristöhallinto 2016a. Ympäristöhallinnon verkkosivu www.ymparisto.fi. Tietojärjestelmät, Pohjavesitietojärjestelmä. viitattu 11.2.2016. [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat_ja_tilastot/Tietojarjestelmat/Pohjavesitietojarjestelma__ohjeita_tiedo\(8279\)](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat_ja_tilastot/Tietojarjestelmat/Pohjavesitietojarjestelma__ohjeita_tiedo(8279))

Ympäristöhallinto 2016b. Ympäristöhallinnon verkkosivu www.ymparisto.fi Vesi, Vesiensuojelu, Pohjaveden suojelu. viitattu 19.2.2016. Julkaistu ja päivitetty 3.2.2016. <http://www.ymparisto.fi/pohjavedensuojelu>

Ympäristöministeriö 2016. Ympäristöministeriön verkkosivu, Uudet säännökset pohjavesialueiden rajaamisesta, luokittelusta ja suojelusuunnitelmista, Tiedote 18.12.2014. Sivulla käyty 31.5.2016. [http://www.ym.fi/fi-FI/Luonto/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Vesien_ja_merensuojelun_lainsaadanto/Uudet_saannokset_pohjavesialueiden_rajaa\(32299\)](http://www.ym.fi/fi-FI/Luonto/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Vesien_ja_merensuojelun_lainsaadanto/Uudet_saannokset_pohjavesialueiden_rajaa(32299))

www.ymparisto.fi, 2016. Pohjavesien määrällinen ja kemiallinen tila. Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu. http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Pohjavesien_tila. Sivulla käyty 7.6.2016.

ISSN-L 1798-6656
ISSN 1798-6664
ISBN 978-952-317-324-8
www.liikennevirasto.fi

Liik
enne
vira
sto